



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Incremento de la recuperación de zinc en el proceso de
lixiviación empleando la metodología Seis Sigma en la
empresa Nexa Resources Cajamarquilla**

INFORME PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Oscar Francisco CARDOZA RAMOS

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Cardoza, O. (2019). *Incremento de la recuperación de zinc en el proceso de lixiviación empleando la metodología Seis Sigma en la empresa Nexa Resources Cajamarquilla*. Tesis para optar título profesional de Ingeniero Metalúrgico. Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

Código Orcid del autor (dato opcional):

No Aplica

Código Orcid del asesor o asesores (dato obligatorio):

No Aplica

DNI del autor:

44277694

Grupo de investigación:

No Aplica

Institución que financia parcial o totalmente la investigación:

Autofinanciado

Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación. Debe incluir localidades y coordenadas geográficas

Carretera Central KM 9.5 Cajamarquilla - Desvío a Huachipa

Año o rango de años que la investigación abarcó:

Febrero 2017 – Marzo 2018



Universidad Nacional Mayor De San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

"Año de la lucha contra la corrupción e impunidad"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE INFORME POR EXPERIENCIA PROFESIONAL PARA
OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

En el Salón de Grados de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, se reunieron el día miércoles 05 de junio del 2019, siendo las 18:00 horas en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

- Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS	Presidente
- Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS	Miembro
- Ing. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR	Miembro

Reunidos para el acto académico Público de Colación del Informe por Experiencia Profesional de don: OSCAR FRANCISCO CARDOZA RAMOS, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, quien sustentará el Informe titulado "INCREMENTO DE LA RECUPERACIÓN DE ZINC EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN EMPLEANDO LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA EN LA EMPRESA NEXA RESOURCES CAJAMARQUILLA", para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico.

Los miembros del Jurado escuchada la colación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCIÓN

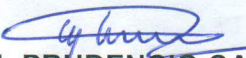
El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

BUEN CE (1.5)

Habiendo sido aprobada la Sustentación del Informe por el Jurado examinador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico a don OSCAR FRANCISCO CARDOZA RAMOS.

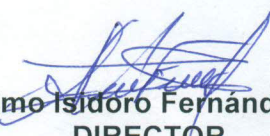
Siendo las 19:00 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la sustentación del Informe.

Ciudad Universitaria, 05 de junio 2019


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS
Presidente


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Miembro


Ing. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
Miembro


Mg. Sósimo Isidoro Fernández Salinas
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



DEDICATORIA DE OSCAR FRANCISCO

El presente trabajo lo dedico a **ORLANDO CARDOZA DE LA CRUZ**, por ser un ejemplo de perseverancia como padre y amigo, a mi esposa **Nadia** por acompañarme en esta travesía de vida junto a nuestra hija, y a **Nexa Resources Cajamarquilla** por brindarme la oportunidad de desarrollarme como profesional.

A todos ellos, con mucho cariño.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	6
ABSTRACT	7
CAPITULO I.....	8
1.1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.2. OBJETIVO.....	10
1.2.1. Objetivo General.....	10
1.2.2. Objetivo Específico	10
CAPITULO II.....	11
2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	11
2.1.1. ¿Qué es Seis Sigma?.....	11
2.1.2. Hidrometalurgia	11
2.1.3. Lixiviación	12
2.1.4. Sedimentación.....	12
2.1.5. Reducción	12
2.1.6. Oxidación	13
2.1.7. Floculante.....	13
2.1.8. Acidez.....	13
2.1.9. Espesadores.....	13
CAPITULO III.....	14
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SEGÚN DISEÑO ORIGINAL	14
3.2. PRINCIPALES MEJORAS HECHAS AL DISEÑO ORIGINAL	16
3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN ACTUAL	24
3.3.1. Lixiviación neutra.....	26
3.3.2. Lixiviación ácida caliente (LAC 1)	29
3.3.3. Reducción ácida (RA).....	32
3.3.4. Pre-neutralización.....	35
3.3.5. Precipitación de indio.....	37
3.3.6. Precipitación y filtración de goethita.....	39
3.3.7. Lixiviación súper ácida caliente (LAC 2)	43
3.3.8. Lavado del residuo plomo/plata	46
CAPITULO IV	49
4.1. DESARROLLO DEL PROYECTO SEIS SIGMA	49
4.1.1. 1ra Etapa – Definir.....	49
4.1.2. 2da Etapa – Medir.	51
4.1.3. 3ra Etapa – Analizar	53
4.1.4. 4ta Etapa - Mejorar.....	57
4.1.5. 5ta Etapa – Controlar.....	63
CAPITULO V	69
5.1. CONCLUSIONES.....	69
5.2. RECOMENDACIONES.....	70
CAPITULO VI	71
3.1. GLOSARIO DE TÉRMINOS	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
ANEXOS.....	76

Representación gráfica de los indicadores clave de proceso (KPI) que afectan directamente a la Recuperación de Zinc	76
Representación Gráfica de los datos históricos del comportamiento de la recuperación de zinc	76
Balance Metalúrgico	77
Imágenes de BSE y datos semicuantitativos - Res. Pb / Ag (40_16) D_2088.....	78
Miembros de Equipo del Proyecto Six Sigma:	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Partes de un Espesador.....	13
Figura N° 2: Diagrama de flujo de diseño original de la refinería de Cajamarquilla	14
Figura N° 3: Diagrama de flujo de lixiviación con etapa de flotación	19
<i>Figura N° 4: Diagrama de flujo de lixiviación con las modificaciones implementadas</i>	20
<i>Figura N° 5: Comportamiento de la recuperación de zinc y sílice soluble en la calcina</i>	21
<i>Figura N° 6: Comportamiento del precio promedio anual de indio en dólares por kilogramo</i>	22
<i>Figura N° 7: Comportamiento del precio promedio del zinc en dólares por tonelada</i> ..	22
<i>Figura N° 8: Diagrama de flujo Proyecto 320K – Refinería de Cajamarquilla</i>	23
<i>Figura N° 9: Diagrama de la etapa lixiviación neutra</i>	28
<i>Figura N° 10: Diagrama de la etapa lixiviación ácida caliente (LAC 1)</i>	31
<i>Figura N° 11: Diagrama de la etapa de reducción ácida (RA)</i>	34
<i>Figura N° 12: Diagrama de la etapa de pre-neutralización</i>	36
<i>Figura N° 13: Diagrama de la etapa de pre-indio</i>	38
<i>Figura N° 14: Diagrama de la etapa de precipitación de goethita</i>	42
<i>Figura N° 15: Diagrama de la etapa de lixiviación súper ácida caliente</i>	45
<i>Figura N° 16: Filtro banda de vacío</i>	48

ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro N° 1: Árbol de Pérdidas - 2016</i>	49
<i>Cuadro N° 2: Diagrama de flujo de Lixiviación</i>	51
<i>Cuadro N° 3: Matriz de priorización del proceso de lixiviación</i>	53
<i>Cuadro N° 4: Matriz de esfuerzo e impacto del proceso</i>	54
<i>Cuadro N° 5: Correlación de variables según Minitab</i>	55
<i>Cuadro N° 6: Plan de acción para el controlar Acidez y Temperatura en LAC 1</i>	60
<i>Cuadro N° 7: Plan de acción para controlar el %S/S en la calcina</i>	62
<i>Cuadro N° 8: Plan de acción de estandarización de los cambios</i>	63
<i>Cuadro N° 9: Resultados de la Investigación Mineralógica</i>	68

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla N° 1: Alimentación de concentrado de zinc al tostador - Ensayos típicos.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla N° 2: Resultados de la prueba de actualización de plata.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla N° 3: Ensayos típicos del residuo de Pb/Ag y del concentrado de flotación de Ag</i>	<i>17</i>
<i>Tabla N° 4: Estadísticas de los niveles de producción y parámetros principales.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla N° 5: Control secuencial de pH en cada tanque de la lixiviación neutra</i>	<i>27</i>
<i>Tabla N° 6: Perfil de pH's de cada tanque en la etapa de precipitación y filtración de Goethita.....</i>	<i>39</i>

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico N° 1: % ZnIW en el residuo Pb/Ag – Período 2016 - 2017.....</i>	<i>50</i>
<i>Gráfico N° 2: Diagrama causa y efecto</i>	<i>52</i>
<i>Gráfico N° 3: Diagrama de Pareto de la matriz de priorización</i>	<i>54</i>
<i>Gráfico N° 4: Correlación de variables con mayor R-cuad (Ajustado)</i>	<i>56</i>
<i>Gráfico N° 5: Comparación gráfica del comportamiento del %ZnIW con las ferritas y los sulfuros de zinc en el residuo Pb/Ag.</i>	<i>57</i>
<i>Gráfico N° 6: Correlación del ZnIW con el %Fe y %S.....</i>	<i>58</i>
<i>Gráfico N° 7: Comparación gráfica del comportamiento de las ferritas de zinc del residuo Pb/Ag con el rendimiento de la LAC 1 y la LAC 2.....</i>	<i>59</i>
<i>Gráfico N° 8: Correlación de Fe Pb/Ag con el Delta LAC 1 y el Delta de LAC 2.....</i>	<i>60</i>
<i>Gráfico N° 9: Comparación gráfica del comportamiento del %S presente en el ZnIW con el %S/S en la calcina y el S de los lodos de la Reducción Ácida.....</i>	<i>61</i>
<i>Gráfico N° 10: Correlación del %S/S y Nivel de lodos en RA.</i>	<i>62</i>
<i>Gráfico N° 11: Gráfica de control de Temperatura del último Tanque de la LAC 1.....</i>	<i>64</i>
<i>Gráfico N° 12: Gráfica de control de la Acidez del O/F del espesador de la LAC 1.....</i>	<i>65</i>
<i>Gráfico N° 13: Gráfica de control del ZnIW en el residuo Pb/Ag</i>	<i>65</i>
<i>Gráfico N° 14: Gráfica de control del %S/S⁼ en la calcina de zinc.....</i>	<i>66</i>
<i>Gráfico N° 15: Gráfica de correlación del %S/S⁼ con el ZnIW en el residuo Pb/Ag.....</i>	<i>66</i>
<i>Gráfico N° 16: Gráfica de control del ZnIW con filtro en el %S/S</i>	<i>67</i>

RESUMEN

El estudio enfoca la aplicación de la metodología “Seis Sigma” con el objetivo de incrementar la recuperación de zinc en el proceso hidrometalúrgico del zinc de la refinería de Cajamarquilla, como unidad productiva de la empresa Nexa Resources, siendo este uno de los negocios del grupo Votorantim.

El problema de la recuperación de zinc se identificó estadísticamente según el árbol de pérdidas del año 2016 (véase pág. 49), donde el mayor porcentaje de pérdidas se da en el proceso de lixiviación, por lo que se analizan las variables de entrada y salida de cada una de las etapas de este proceso para definir los límites del estudio.

Las pruebas se orientan a la reducción del porcentaje de zinc que se presenta como un compuesto insoluble en el producto final del proceso de lixiviación, representado como zinc insoluble del residuo plomo/plata (ZnIW), por medio de la aplicación de la metodología seis sigma utilizando herramientas estadísticas para identificar qué variables son las que tienen mayor impacto y con ellas plantear acciones que sean sostenibles en el tiempo para controlar la variabilidad del proceso.

Se proyecta recuperar el 1.09% de zinc en el residuo Pb/Ag (véase árbol de pérdidas, pág. 49), donde éste representa el 0.15% de la recuperación global de la producción de la refinería de zinc, el cual refleja una ganancia de US \$ 1.03 millones de dólares americanos al año.

Se concluye que la aplicación de la metodología seis sigma, siendo esta una herramienta estadística de mejora continua, garantiza la reducción de la variabilidad del proceso con el uso de análisis estadísticos planteando controles estrictos en cada una de las variables estudiadas para así disminuir el mayor porcentaje de pérdidas.

ABSTRACT

The study focuses on the application of the "Six Sigma" methodology with the objective of increasing the recovery of zinc in the zinc hydrometallurgical process of the Cajamarquilla refinery, as a productive unit of the Nexa Resources Company, this being one of the group's businesses Votorantim

The problem of zinc recovery was statistically identified according to the 2016 loss tree (see page 49), where the highest percentage of losses occurs in the leaching process, so the input and output variables are analyzed of each of the stages of this process to define the limits of the study.

The tests are aimed at reducing the percentage of zinc that appears as an insoluble compound in the final product of the leaching process, represented as insoluble zinc of the lead / silver residue (ZnIW), through the application of the methodology six sigma using statistical tools to identify which variables have the greatest impact and with them propose actions that are sustainable over time to control the variability of the process.

It is planned to recover 1.09% zinc in the Pb / Ag residue (see loss tree, page 49), where it represents 0.15% of the overall recovery of zinc refinery production, which reflects a profit of US \$ 1.03 million of US dollars per year.

It is concluded that the application of the methodology six sigma, being this a statistical tool of continuous improvement, guarantees the reduction of the variability of the process with the use of statistical analysis by proposing strict controls in each of the variables studied in order to decrease the greater percentage of losses.

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCIÓN

Como informe de experiencia profesional se describe el proyecto para incrementar de la recuperación de zinc en la refinería de Cajamarquilla mediante el uso y aplicación de la metodología “Seis Sigma” como herramienta de mejora continua en el proceso hidrometalúrgico de zinc de la empresa Nexa Resources, uno de los negocios del grupo Votorantim, con el objetivo de reducir el porcentaje de pérdidas del proceso incrementando la recuperación de zinc proyectando una ganancia anual.

Dentro de los conceptos de la metodología, Seis Sigma establece cinco pilares a trabajar: “Definición” del problema/oportunidad, “Medición” de las variables definidas, “Análisis” de la información obtenida, “Mejora” planteamiento de acciones para lograr los beneficios y mejoras, y “Control” de las variables para mantener los resultados obtenidos en el tiempo.

Según la metodología, en la etapa de “Definición” se realizó el estudio de pérdidas de todo el proceso de producción de zinc refinado de Cajamarquilla del año productivo del 2016, y según esta información se identifica que el mayor porcentaje de pérdidas se encuentra en el proceso hidrometalúrgico del zinc, específicamente en la etapa de lixiviación ácida; por tanto, se proyectó una meta anual según la evaluación estadística del 1er cuartil del porcentaje de Zinc presente como compuesto insoluble contenido en el residuo Pb/Ag que impacta directamente a la recuperación global de zinc (véase página N° 50).

Definido el problema se formó un equipo de trabajo con colaboradores de diferentes niveles que laboran en esta planta: operadores, supervisores, jefes de guardia, jefes de planta, ingenieros de procesos, ingenieros consultores y la misma gerencia del área, para así obtener una información sólida a trabajar y definir con eficacia las variables que tengan mayor correlación con los resultados proyectados, aquí se inició la etapa de “Medición” donde se realizó una lluvia de ideas con el equipo para evaluar las variables de entrada y salida del proceso, que tengan alto y bajo impacto, y a la vez que demanden de alto y bajo esfuerzo para buscar el control de las variables.

Con esta información obtenida, en la etapa de “Análisis”, se calificó las variables según un puntaje en función a la regla establecida por la metodología con cada uno de los integrantes del equipo, realizando la “Matriz de Esfuerzo e Impacto”, que distribuye estas variables en una tabla para iniciar con la filtración de la información y trabajar con las variables que tengan la mayor correlación pero con un alto impacto en los resultados.

En la siguiente etapa de “Mejora” se plantean acciones alineadas a las variables resultantes de la etapa anterior según las correlaciones realizadas, con ello se

busca planificar actividades que agreguen valor al control de las variables con plazos y responsables por cada una de ellas y hacer un seguimiento del cumplimiento.

Por último, en la etapa de “Control” se establecieron padrones de proceso y estandarización de parámetros para mantener los resultados en el transcurso del tiempo, se realizó difusión del proyecto al personal de operaciones y se inició con los entrenamientos al personal para mantener el control de las variables constantes.

Culminado el estudio se realizó una proyección de ganancia que se alcanzará según el cumplimiento del plan de acción que aún tiene acciones en plazo.

1.2. OBJETIVO

1.2.1. Objetivo General

Disminuir la pérdida de zinc de la etapa de lixiviación ácida representado como zinc Insoluble en el residuo plomo plata (ZnIW residuo Pb/Ag), empleando la metodología seis sigma.

1.2.2. Objetivo Específico

Alcanzar el 2.81% de zinc insoluble en el residuo plomo plata (primer cuartil) del promedio evaluado para todo el año 2016 según análisis inicial de 3.90%.

CAPITULO II

2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

2.1.1. ¿Qué es Seis Sigma?

Seis sigma, es una filosofía de trabajo y una estrategia de negocios, la cual se basa en el enfoque hacia el cliente, en un manejo eficiente de los datos, metodologías y diseños robustos, que permite eliminar la variabilidad en los procesos así como alcanzar un nivel de defectos menor o igual a 3,4 defectos por millón. Adicionalmente, otros efectos obtenidos son: reducción de los tiempos de ciclo, reducción de los costos, alta satisfacción de los clientes y más importante aún, efectos dramáticos en el desempeño financiero de la organización. (Arq. Edgar Giovanni Treviño Orozco, 2004 pág. 4 - 5).

En general, las técnicas tradicionales tienden a comportarse dentro del rango de tres sigmas, lo que equivale a un número de defectos de casi 67.000 por millón de oportunidades (DPMO), ocurre un desplazamiento de 1,5 sigma; esto significa un nivel de calidad de apenas 93,32%, en contraposición con un nivel de 99,9997% para un proceso de seis sigma. Comparativamente, un proceso de tres sigma es 19.645 veces peor (produce más defectos) que uno de seis sigma.

¿Quiénes utilizan seis sigma? Empresas comprometidas con la satisfacción del cliente en la entrega oportuna de productos y servicios, libres de defectos y a costos razonables. Algunos ejemplos: Motorola, Allied Signal, G.E., Polaroid, Sony, Lockheed, NASA, Black & Decker, Bombardier, Dupont, Toshiba, etc.

2.1.2. Hidrometalurgia

Es la rama de la metalurgia que comprende la extracción de metales valiosos desde minerales o concentrados de flotación que los contienen, usando soluciones líquidas acuosas a temperaturas relativamente bajas. Se basa en lograr lixiviar (disolver) y obtener soluciones suficientemente concentradas en uno o varios elementos de interés, presentes como iones, para finalmente separarlos y aislarlos bajo la forma de metales aprovechando sus propiedades físico-químicas (electroquímicas). (Jose Luis Macassi Meza, 2016 pág. 3).

La hidrometalurgia implica una separación lo más selectiva posible de un elemento metálico y su procesamiento hasta su forma final comercializable (metales, aleaciones o compuestos).

La hidrometalurgia se subdivide en tres ramas importantes, las cuales son:

- a.- Lixiviación
- b.- Concentración y Purificación
- c.- Precipitación

En líneas generales las principales ventajas de los procesos hidrometalúrgicos son:

- Sus procesos tienen un menor impacto ambiental en comparación a otros procesos extractivos.
- Bajos costos de inversión para un tamaño de planta dado, en comparación a otros procesos extractivos.
- Posibilidad de expansión desde una operación pequeña a otra de tamaño mediano, conservando siempre la economía de una operación en gran escala. Esto es debido al carácter modular de las plantas hidrometalúrgicas.
- Algunos procesos hidrometalúrgicos permiten un ahorro considerable de combustible, como es el caso de tratar los minerales directamente en sus yacimientos o los que evitan el proceso de molienda. Estos ahorros de energía representan una fracción apreciable del consumo total de un proceso convencional.
- Existe un gran control sobre las reacciones, debido a las condiciones cinéticas en que se desarrollan los procesos.
- Es posible una gran automatización.

2.1.3. Lixiviación

En la refinería de Cajamarquilla, lixiviación refiere a la disolución del zinc desde las calcinas de la tostación donde se encuentra como óxido de zinc y ferrita de zinc (solución sólida de ZnO en Fe_2O_3) para formar una solución acuosa de sulfato de zinc factible para electro-depositar luego de procedimientos apropiados de purificación.

Técnicamente es el proceso donde un metal se extrae desde el material que lo contiene disolviéndolo en un solvente acuoso.

2.1.4. Sedimentación

Es la separación de sólidos de líquidos que los contienen mediante el agregado de reactivos químicos que alteran su estado físico superficial (floculantes, coagulantes, etc.) y facilitan su asentamiento gravitacional.

2.1.5. Reducción

Es el proceso electroquímico por el cual un ion reduce su estado de valencia ganando electrones. Este proceso es contrario al de una oxidación y se caracteriza por lo siguiente:

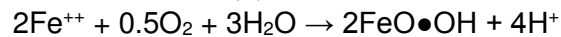
- Gana electrones.
- Actúa como agente oxidante.
- Es reducido por un agente reductor.

Ejemplo: La conversión de ion férrico (III) a ion ferroso (II): $\text{Fe}^{+++} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{++}$

2.1.6. Oxidación

La oxidación es una reacción electroquímica donde un compuesto, elemento o ion cede electrones y por lo tanto aumenta su estado de valencia u oxidación. Se debe tener en cuenta que en realidad una oxidación o una reducción es un proceso por el cual cambia el estado de oxidación de un compuesto sin que este cambio signifique necesariamente un intercambio de electrones.

Ejemplo: Oxidación del ion ferroso (II) a Goethita:



2.1.7. Floculante

Sustancia química que aglutina/aglomera sólidos finos en suspensión facilitando su sedimentación.

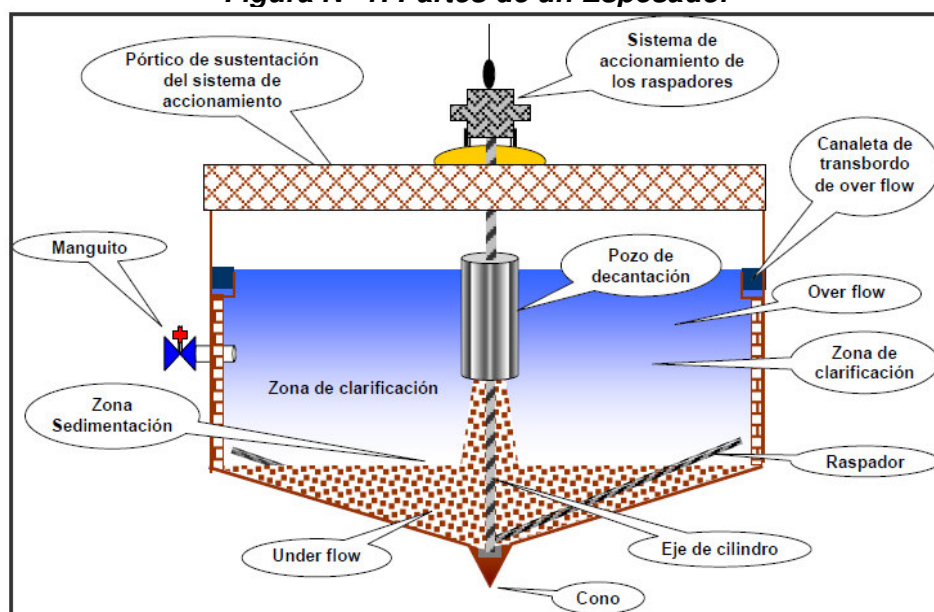
2.1.8. Acidez

La acidez de una sustancia es el grado en el que es ácida. La acidez libre, en el caso de un medio acuoso, se mide como la concentración de H_2SO_4 en la solución y es el KPI más usado para el control de procesos. Para soluciones muy bajas en H_2SO_4 se mide el pH.

2.1.9. Espesadores

Su función es la separación continua sólido-líquido (S/L), los sólidos en suspensión se dejan sedimentar produciendo un rebose de solución clarificada denominado over-flow (O/F) y un lodo denso acumulado en la descarga inferior conocido como under-flow (U/F).

Figura N° 1: Partes de un Espesador



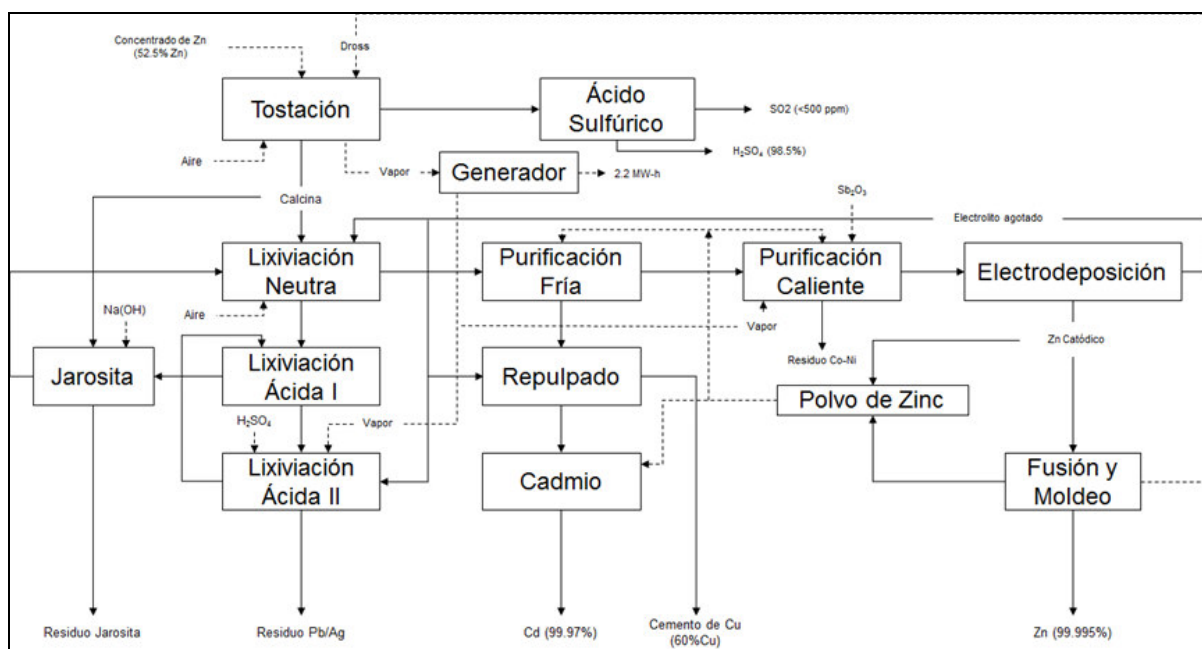
Fuente: Manual del Operador – Gerencia de Hidrometalurgia, Nexa Resources Cajamarquilla

CAPITULO III

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SEGÚN DISEÑO ORIGINAL

La capacidad de diseño de la Refinería fue de 101,500 toneladas métricas por año de zinc refinado en lingotes de SHG (Special High Grade). La Figura N° 2 muestra el diagrama de flujo global simplificado de la Refinería de Cajamarquilla, según el cual haremos algunos comentarios breves sobre las características principales de cada una de las etapas del proceso inicial. (M. V. Málaga y K. A. Metcalfe, 1998 pág. 650).

Figura N° 2: Diagrama de flujo de diseño original de la refinería de Cajamarquilla



Fuente: "Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery"

3.1.1. Tostación

La operación de tostación fue diseñada y construida por Lurgi GmbH para tratar concentrados que tienen la composición típica dada en la Tabla N° 1. Tiene un tostador de lecho fluidizado con 100 m² de área de fluidización, seguido de una caldera de cinco haces tipo Lamont para recuperar el calor del flujo de gas en un circuito cerrado con serpentín de enfriamiento en el lecho del horno. Este sistema produce vapor supersaturado que se utiliza para generar 2,2 MW de energía y para satisfacer las necesidades de los procesos de lixiviación y purificación. El sistema para recuperar el polvo de los gases de escape consiste en dos ciclones en paralelo y dos precipitadores electrostáticos también en paralelo, cada uno con dos compartimentos. La calcina del producto, junto con las capturas de la caldera, se enfría, se muele y

se almacena, junto con la calcina de los ciclones y precipitadores, en dos silos con una capacidad combinada de 15 días de operación.

Tabla N° 1: Alimentación de concentrado de zinc al tostador - Ensayos típicos

	[%]		[%]		[%]
Zn	52.0	Cu	0.60	Cl	0.0130
S	32.0	Al ₂ O ₃	0.36	Ag	0.0130
Fe	8.3	Mn	0.30	Co	0.0016
Insol	2.6	Cd	0.19	Ni	0.0012
SiO ₂	1.5	As	0.17	Tl	0.0012
Pb	1.3	MgO	0.17	Ge	0.0005
CaO	0.7	Sb	0.05	Hg	0.0002

Fuente: "Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery"

3.1.2. Planta de ácido sulfúrico

El enfriamiento, lavado y enjuague de los gases del tostador se realiza en una torre desempacada, una torre empacada y cuatro precipitadores electrostáticos en paralelo. Los gases se envían a la planta de ácido utilizando dos sopladores centrífugos en paralelo que se ubican después de la torre de secado. La planta de ácido fue construida por Mechim, el antiguo brazo de ingeniería de la compañía belga Union Minière. La planta fue diseñada por Ralph M. Parson Inc. e incluye catálisis doble, doble absorción con tres intercambiadores de gas y gas, una de las cuales es la primera etapa de absorción de catálisis. La torre del convertidor tiene tres lechos de catalizador para la primera etapa y uno para la segunda etapa. El ácido de las torres de absorción se enfría en intercambiadores de calor horizontales que emplean un sistema de protección catódica para prevenir la corrosión.

3.1.3. Lixiviación de calcina y remoción de hierro

El diseño de esta planta fue realizado por Asturiana de Zinc de España e incluye una etapa de lixiviación neutra y dos etapas de lixiviación ácida a contracorriente, una de las cuales es superácida y funciona en condiciones de calor con intercambiadores de placa de grafito para calentar el electrolito agotado. La extracción de hierro se realiza mediante el proceso de jarosita en dos etapas. El filtrado de residuos se realiza en dos filtros de tambor de recuperación para los residuos de plomo/plata de la lixiviación ácida y en un filtro de bandeja horizontal (tipo Prayon) para los residuos de jarosita. Los residuos se almacenan en estanques revestidos con geo-membranas a prueba de agua (pozas impermeabilizadas).

3.1.4. Purificación de Soluciones

La purificación de la solución se lleva a cabo en dos etapas. El proceso fue diseñado por Vieille Montagne (Union Minière). En la primera etapa,

conocida como purificación en frío, el cobre y el cadmio se precipitan con polvo de zinc. Para la segunda etapa, la solución filtrada de la primera etapa se calienta a 90° C en intercambiadores de calor en espiral y, a través de la adición de Sb_2O_3 y el polvo de zinc fino, se precipitan el cobalto y el níquel. La solución filtrada de esta etapa se dirige a un colono cónico (copa de champán) para eliminar parte del yeso y evitar que las impurezas en el estado sólido se muevan río abajo. La solución de sulfato de zinc purificado se enfría y se almacena en tres tanques con capacidad suficiente para 16 horas de funcionamiento de la celda.

3.1.5. Electrólisis

Esta planta fue construida por Lurgi con la ingeniería básica de Vieille Montagne. La casa de celdas tiene ocho filas de celdas, 29 celdas por fila y 49 ánodos con 48 cátodos por celda. Hay diez torres de enfriamiento para el electrolito, cuatro máquinas de extracción de cátodos, cada una con un sistema de limpieza que utiliza cepillos de acero para los cátodos de aluminio. Los sistemas de limpieza de celdas y ánodos incluyen dos marcos utilizados para cortocircuitar tres celdas a la vez y equipos para aplanar los ánodos y eliminar los depósitos de manganeso con agua a alta presión. Cada cátodo tiene un área de depósito de 2,6 m². La casa de celdas fue diseñada para funcionar con una densidad de corriente máxima de 420 A/m² y con un ciclo de deposición de 48 horas.

3.1.6. Fusión y fundición

Para derretir los cátodos de zinc, se instaló un horno de inducción de 2 MW con una máquina de fundición de lingotes Sheppard en línea con raspado manual, eliminación manual de escoria y un sistema automático para apilar y pesar los lingotes. La capacidad de este sistema es de 18 toneladas métricas por hora de zinc refinado en barras.

3.1.7. Polvo de zinc

La refinería se construyó con una planta para producir polvo de zinc para satisfacer sus propias necesidades de consumo interno. El polvo de zinc se produce mediante atomización con aire, y la planta utiliza un horno de inducción eléctrica de 0,2 MW y cuatro crisoles de grafito para la atomización del zinc. La capacidad de esta planta es de 25 toneladas métricas de polvo de zinc por día.

3.2. PRINCIPALES MEJORAS HECHAS AL DISEÑO ORIGINAL

3.2.1. Reconocimiento mejorado de plata

El diseño original de la refinería asumió que la comercialización directa de los residuos de plomo/plata obtenidos de los filtros rotativos de la sección de lixiviación ácida sería económicamente viable. El mejor precio que fue posible obtener para estos residuos fue insuficiente para cubrir el costo de la plata

pagadera en los concentrados. En consecuencia, la venta de estos residuos resultó en un costo más que en un beneficio.

Finalmente, el objetivo de mejorar la recuperación de Ag se logró a través del tratamiento selectivo de calcinas durante la lixiviación; es decir, solo las calcinas que tienen bajos contenidos de plata se utilizan en la precipitación de jarosita.

Mejora en los contenidos de Ag de los residuos a comercializar

Después de analizar varias opciones, como la centrifugación, la lixiviación por cloración y la flotación de los relaves de Pb/Ag para mejorar el contenido de Ag de estos residuos, se decidió, basándose en el análisis de los resultados resumidos en la Tabla N° 2, construir una planta de flotación que se enfocó solo en la recuperación de plata (Ag), como se muestra en la Figura N° 3. Esta modificación se implementó en 1988. La Tabla N° 3 muestra los análisis típicos del residuo de Plomo/Plata, así como el del concentrado de plata obtenido de la planta de flotación.

Tabla N° 2: Resultados de la prueba de actualización de plata

	Grado del Producto	Recuperación de Ag	Costo capital	Dificultades para el circuito de Zn
Lixiviación de Cloro	Alto [Cemento de Ag]	Alto < 98%	Alto	Alto
Centrífugas	Pobre [0.02% Ag]	Alto < 98%	Alto	Bajo
Flotación	Bueno [1.25% Ag]	Bueno < 80%	Razonable	Bajo

Fuente: "Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery"

Tabla N° 3: Ensayos típicos del residuo de Pb/Ag y del concentrado de flotación de Ag

	Residuo Pb/Ag [%]	Concentrado de Ag [%]
Pb	12.60	16.30
Ag	0.10	1.25
Au [g/mt]	2.20	9.40
As	0.16	0.10
Sb	0.20	0.12
Fe	11.00	5.00
Zn	8.10	2.50
Bi	0.02	0.08
Cu	0.40	0.40

Fuente: "Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery"

3.2.2. Recuperación de zinc

Al igual que los niveles de producción de Cajamarquilla, que fueron altamente variables, como se muestra en la Tabla N° 4, los niveles de recuperación de zinc también fueron muy irregulares. En consecuencia, a menudo era muy difícil explicar las causas de las variaciones en los niveles de recuperación de zinc. Se siguió una cuidadosa metodología para identificar las causas y buscar la medida correctiva más eficiente. Las principales etapas seguidas para mejorar la recuperación de zinc se presentan a continuación.

Tabla N° 4: Estadísticas de los niveles de producción y parámetros principales

Año	Producción (t)		Recuperación [%]		Eficiencia Actual [%]
	Zinc	Ácido	Zn	Ag	
1982	92,200	174,290	94.2		91.4
1983	89,780	169,480	93.5		92.0
1984	83,660	167,400	94.7		91.7
1985	93,590	170,210	94.8		92.7
1986	96,050	174,050	95.2		92.7
1987	78,720	139,530	94.4		92.3
1988	72,840	139,320	93.6		91.2
1989	73,010	147,210	93.0	42.8	91.0
1990	61,130	128,920	92.8	43.0	91.7
1991	92,880	163,260	92.6	46.8	91.4
1992	63,050	116,580	91.4	41.5	91.7
1993	92,520	179,910	94.2	40.0	91.3
1994	93,340	174,470	92.4	52.8	91.9
1995	92,020	170,810	95.1	63.7	92.7
1996	105,450	189,300	95.1	67.8	93.0
1997	103,320	186,050	94.6	64.3	92.4

Fuente: "Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery"

El efecto de implementar la flotación de residuos de Pb/Ag

Como puede verse en la Tabla N° 4, hasta 1987 la recuperación de zinc alcanzó un nivel bastante razonable de aproximadamente el 95%. Tras la implementación del proceso de flotación de residuos de Pb/Ag, los cambios en los parámetros del proceso fueron casi imperceptibles (ver Figura N° 3); sin embargo, la recuperación de zinc disminuyó dramáticamente a 92.5%. Se analizaron las siguientes condiciones de causa y efecto en el proceso:

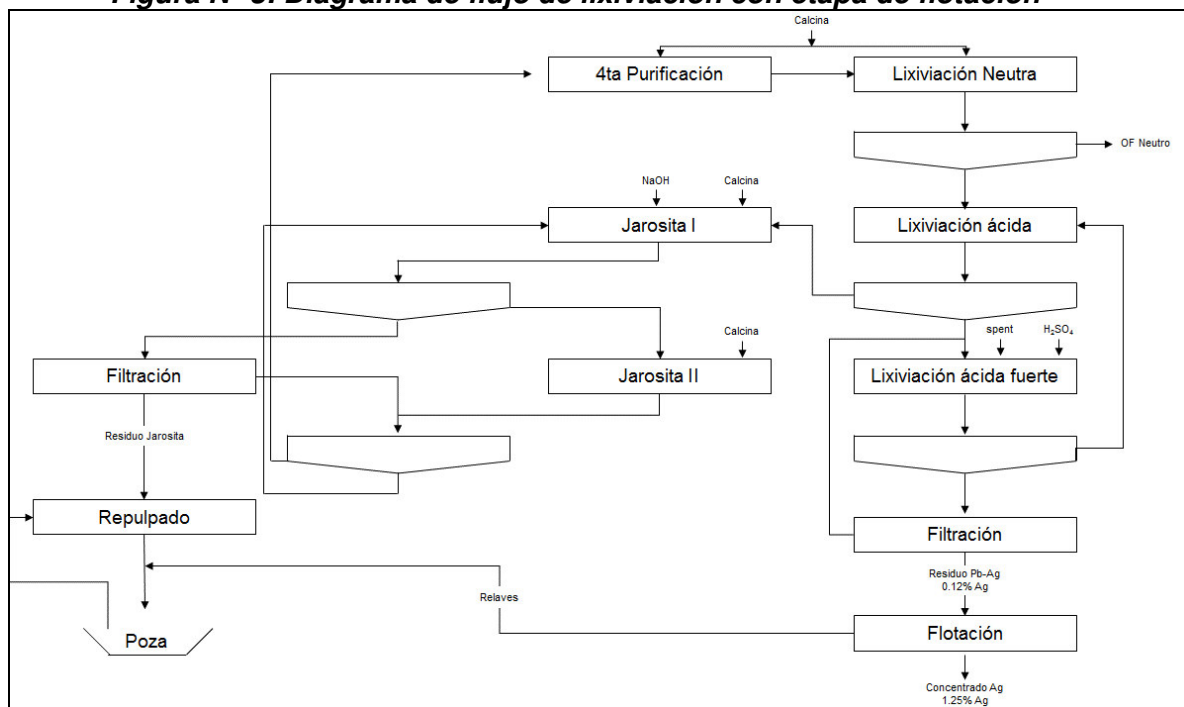
- **Causa:** Mayor acidez en la etapa de lixiviación ácida para mejorar la lixiviación de ferrita con zinc y evitar la presencia de jarosita en el residuo de Pb/Ag, garantizando así la recuperación de Ag. Además, al descomponer el contenido de Fe del residuo de Pb/Ag, se incrementó la cantidad de Fe a eliminar con la jarosita.

Efecto: Mayor consumo de calcina en la fase de jarosita, lo que aumenta la proporción de calcina (jarosita)/calcina (lixiviación neutra) de 25/75 a 30/70, con un efecto directo en la recuperación de zinc.

- **Causa:** Presencia de sílice soluble en el circuito como resultado de un aumento en las concentraciones de SiO_2 en la solución de retorno de los estanques (pozas) de almacenamiento de jarosita como consecuencia de la mezcla de los relaves de flotación y la jarosita para su almacenamiento a largo plazo.

Efecto: Disminución dramática en la eficiencia de filtración de residuos de jarosita, lo que aumenta el contenido de zinc soluble a partir de valores inferiores al 1%, valores superiores al 2%.

Figura N° 3: Diagrama de flujo de lixiviación con etapa de flotación

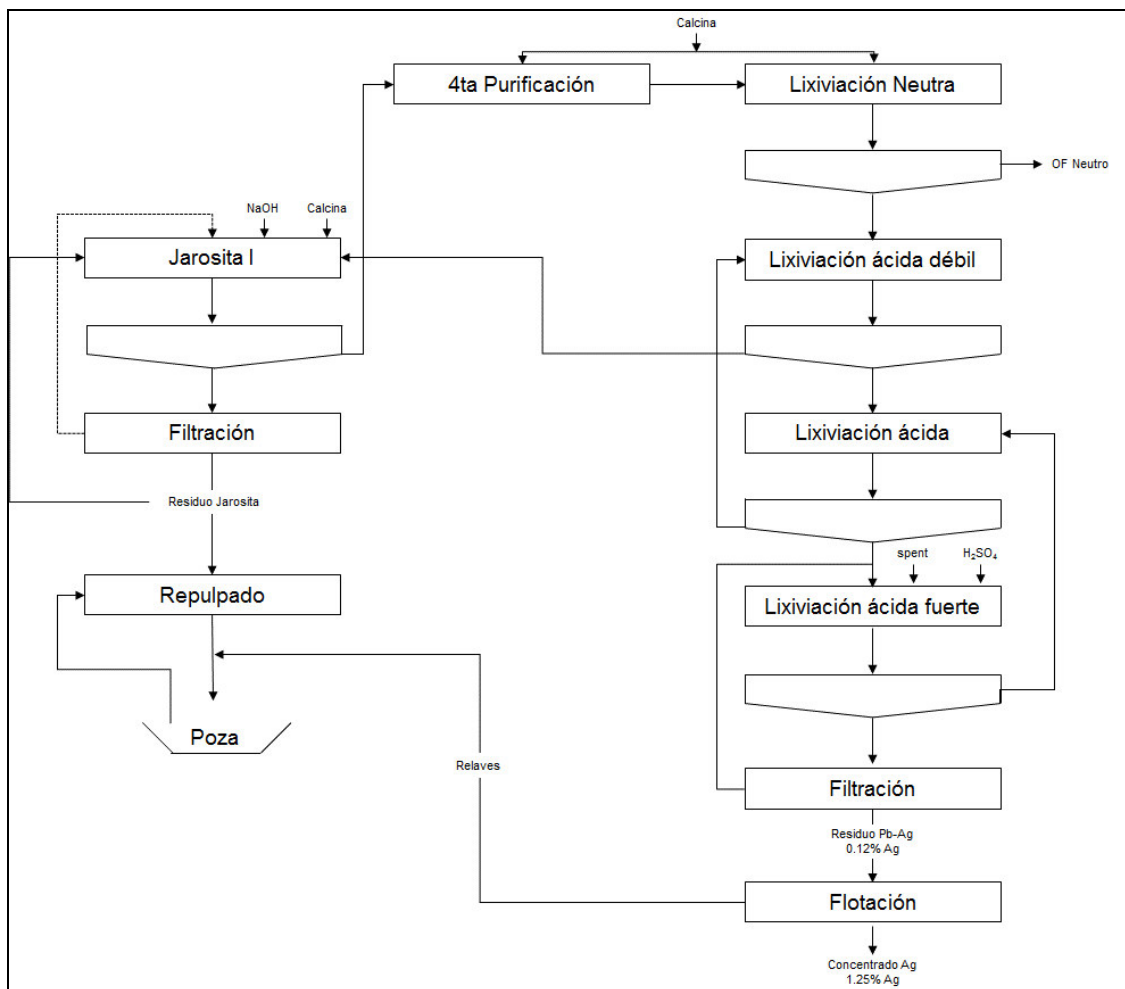


Fuente: "Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery"

Para corregir las causas analizadas; los cambios que se muestran en la Figura N° 4 y que se resumen a continuación se implementaron en 1993.

- Se introdujo un proceso adicional de lixiviación ácida débil, que reduce la proporción de calcina (jarosita)/calcina (lixiviación neutra) a 17/83.
- La precipitación de la jarosita se realizó en una sola etapa con el reciclaje parcial de sólidos para proporcionar la siembra; se implementó la adición de calcina en tres de los seis reactores instalados. Se logró un mejor control de la acidez libre durante la precipitación de jarosita, mejorando así la eficiencia de precipitación y reduciendo la cantidad de Fe reciclado a lixiviación neutra.

Figura N° 4: Diagrama de flujo de lixiviación con las modificaciones implementadas



Fuente: "Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery"

El efecto de la temperatura de la tostación sobre la sílice soluble presente en la calcina

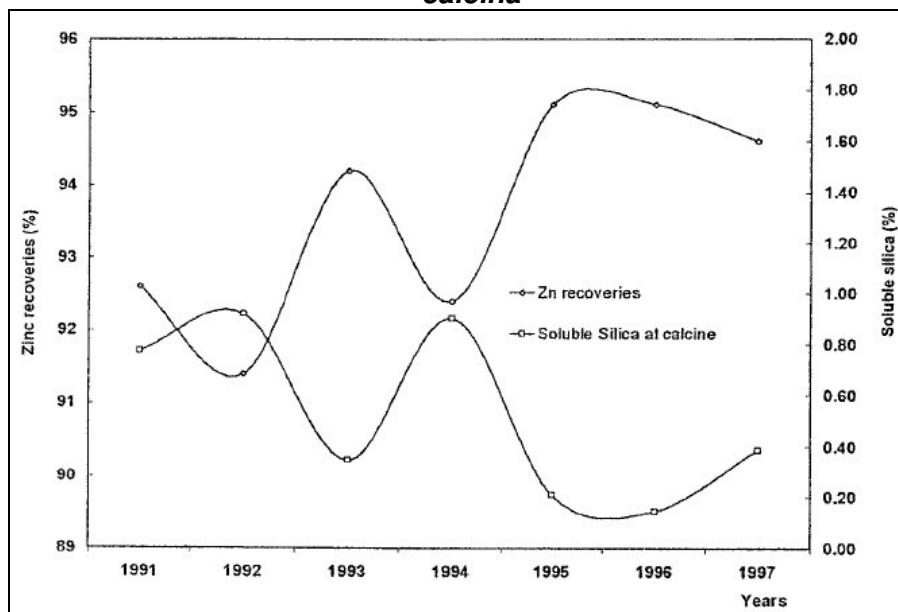
A pesar de los cambios implementados, la filtrabilidad del residuo de jarosita todavía mostró un comportamiento errático, lo que resultó en una recuperación de zinc de 92.4% durante 1994.

Teniendo en cuenta que el principal factor que afecta a la eficiencia de filtración puede ser la presencia de sílice coloidal, se evaluó la posible presencia de sílice soluble en la calcina. Se utilizó un método indirecto, consistente en evaluar la proporción de los contenidos insolubles en los concentrados alimentados al tostador y en la calcina producida. Esta evaluación concluyó que para temperaturas superiores a 920°C en el lecho del tostador, hasta el 50% de la sílice contenida en los concentrados se convirtió en sílice soluble en la calcina. Sin embargo, para temperaturas del lecho que varían de 890°C a 910°C, menos de 10% de la sílice experimentó tal transformación. Además, se encontró un fuerte efecto adverso en la eficiencia de la filtración del residuo de jarosita cuando la

calcina se produjo usando altas temperaturas en el lecho del tostador, lo que resultó en un alto contenido de sílice soluble como se sugiere en la Figura N° 5.

Como medidas correctivas, el área de enfriamiento en el lecho del tostador se incrementó de 25 m² a 30 m² en octubre de 1994, y a 35 m² en mayo de 1996. La consecuencia fue que los niveles de recuperación de zinc aumentaron y volvieron a ser del 95%.

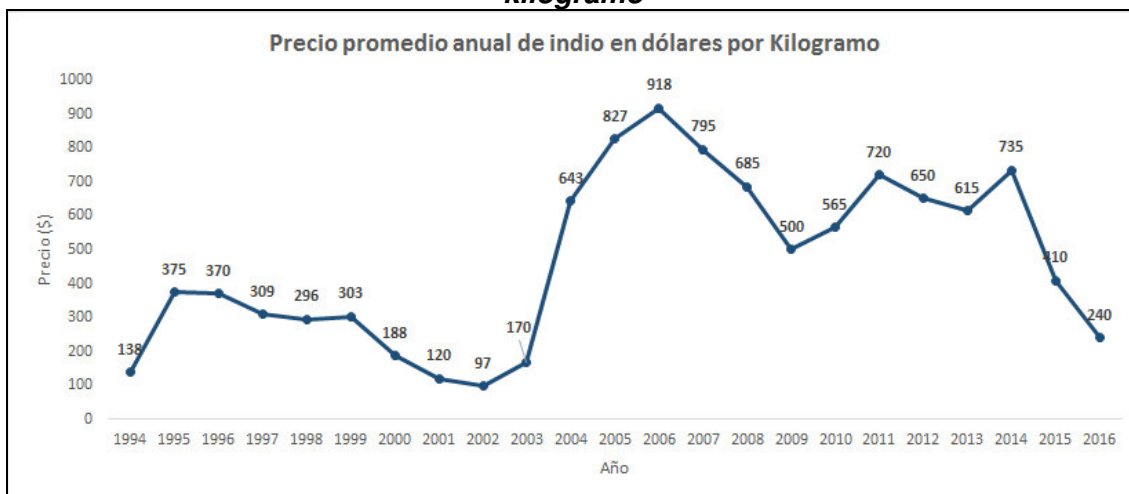
Figura N° 5: Comportamiento de la recuperación de zinc y sílice soluble en la calcina



Fuente: "Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery"

La tecnología con la que inició la producción de la refinería de Cajamarquilla, según el diseño convencional, se basó en la tecnología Jarosita (Proyecto 100K – Figura N° 2), luego para fines del 2007 se culminó con la modificación de la tecnología de la planta, donde se migró del proceso de precipitación de fierro Jarosita a Goethita (Proyecto 160K), con el objetivo de producir indio refinado además de un residuo con mayor contenido de fierro, esto a causa del considerable incremento del precio de venta del indio refinado como lo muestra la Figura N° 6.

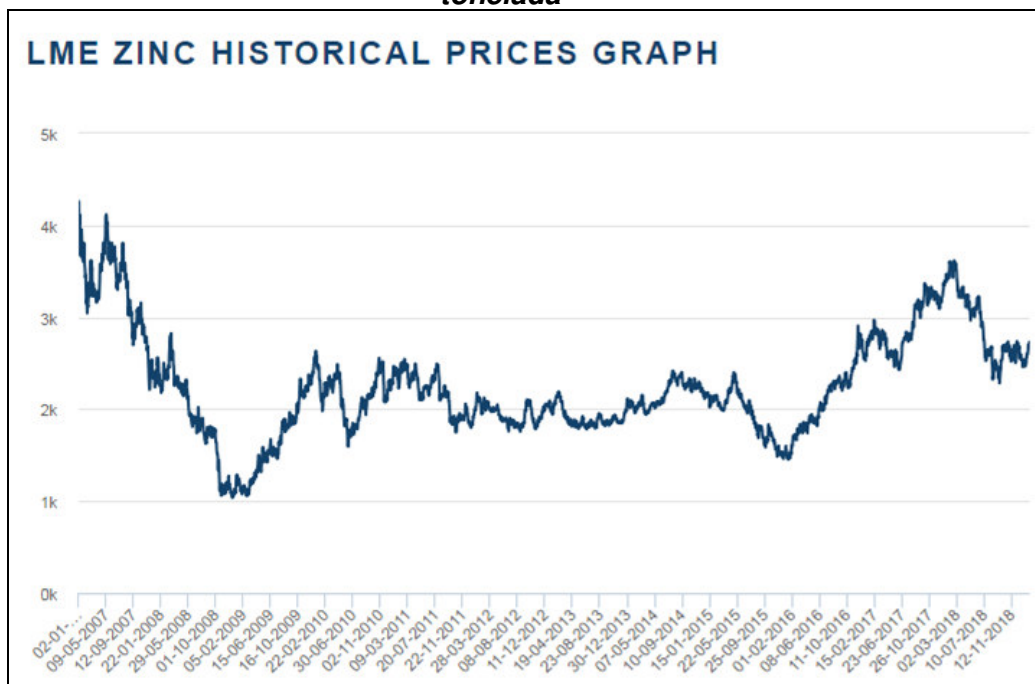
Figura N° 6: Comportamiento del precio promedio anual de indio en dólares por kilogramo



Fuente: "El Indio en Bolivia: Muchos ceros a la izquierda – Adriana Zapata Rosso"

Según el análisis de los precios del Indio que se tuvieron en el año 2005, considerando el apreciable alza no solo del indio sino también de un estudio económico realizado por la misma empresa referente a la proyección de incremento del precio de zinc (Figura N° 7), decidieron invertir en una 2da etapa de ampliación para el 2008, el cual consistía en triplicar la producción con la que se diseñó (Proyecto 320K) y alcanzar la estabilidad operacional, ver Figura N° 8.

Figura N° 7: Comportamiento del precio promedio del zinc en dólares por tonelada



Fuente: "London Metal Exchange - Zinc"

En Febrero del 2010, culminó la segunda etapa del proyecto de ampliación para lograr producir 320 000 ton/año de zinc refinado, se invirtió 500 millones de dólares en una nueva planta de tostación y ácido con capacidad de producción de 1056 TMS/día de calcina, la ampliación de la planta de lixiviación con nuevos tanques y espesadores para cada etapa, filtros de banda, de discos y de tipos prensa para alcanzar una capacidad de tratamiento de 450 m³/h de solución pura, y por último en la planta de electrólisis se construyó una nueva casa de celdas para incrementar la producción de zinc electrolítico, a ello en la planta de fusión y moldeo se compró una planta de moldeo continuo “Outotec” el cual duplicó la producción de lingotes.

Durante el periodo de producción de indio refinado para Cajamarquilla, en el año 2014, se presenta una caída considerable de los precios del indio en el mercado de metales raros el cual obliga a Nexa Resources a cerrar la planta de refinación de indio a causa de que el precio de venta no llegó a cubrir todos los gastos de producción, administrativos y de ventas, por ello la decisión del cierre.

Con este cierre de planta se direcciona los “lodos” (under flow) de la etapa de “pre indio” hacia la lixiviación súper ácida (LAC 1) para recuperar el zinc presente en este lodo ya que en esta etapa se alimenta calcina, como se muestra en la Figura N° 8.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN ACTUAL

Los objetivos principales del proceso de lixiviación incluyen:

- Disolver sustancialmente todo el óxido de zinc (ZnO) y metales solubles que lo acompañan (hierro, cobre, cadmio, cobalto, etc.) contenidos en las calcinas de zinc (producto de la tostación) con el uso de una solución de ácido sulfúrico (electrolito gastado o también llamado “spent”) que se recicla desde la etapa de electrodeposición de zinc.
- Separar el hierro disuelto desde la solución de lixiviación como un residuo sólido insoluble (Goethita) para disponer de una solución de sulfato de zinc factible de someterse a una mayor purificación como etapa previa a la electrodeposición.
- Obtener un residuo final de Plomo/Plata para su tratamiento posterior por flotación y producir un concentrado de plata.
- Separar el Indio por hidrólisis, desde una etapa intermedia, como un precipitado para su tratamiento posterior en la planta de Indio (por un asunto de bajos precios esta planta está fuera de operación temporalmente).

El proceso Goethita contempla las siguientes etapas para la obtención de soluciones impuras de sulfato de zinc:

- Lixiviación neutra.
- Lixiviación ácida caliente (LAC 1).
- Lixiviación súper ácida caliente (LAC 2).
- Filtración del residuo plomo/plata.
- Preparación de pulpa de concentrado de zinc.
- Reducción ácida (RA).
- Pre-neutralización.
- Precipitación de Indio.
- Precipitación de Goethita.
- Filtración de Goethita.

El proceso de lixiviación determina la recuperación de zinc en la refinería y la separación de los diferentes elementos que vienen junto al zinc tales como Pb/Ag, cobre, cadmio y cobalto.

En esta etapa del proceso, los óxidos de zinc (ZnO y $\text{ZnO} \bullet \text{Fe}_2\text{O}_3$) contenidos en las calcinas que provienen del horno de tostación se transforman en disoluciones acuosas de sulfato de zinc para que finalmente termine como zinc refinado (Zn al 99.995%) luego de paso por la purificación y electrólisis.

Los procesos se efectúan en reactores que son tanques recubiertos de material antiácido (ladrillos silico/aluminosos) para minimizar pérdidas de calor y se descargan en continuo por convección natural mediante “chimeneas”. Asimismo, la mayoría de los tanques de almacenamiento de solución también están recubiertos y cuentan con descargas. En cualquier tanque donde se haya detenido el agitador, es política estándar parar (por enclavamiento) la alimentación sólidos. De otro lado se suministra aire comprimido a todos los tanques de reacción para asistir en el flujo ascendente de subida de la pulpa por las comunas de descarga:

Las siguientes prácticas operativas se aplican a los espesadores de lixiviación:

- Todos los espesadores cuentan con columnas (tanques) de colección de descarga de sus under/flow (U/F), desde donde la pulpa se bombea a la siguiente etapa del proceso utilizando una (o más) bombas neumáticas (POM) sincronizadas por el DCS (Sistema de Control Distribuido). Cuando se operan varias bombas en paralelo, el DCS compensa los ciclos de bomba para impedir que las bombas extraigan alimentación del tanque de descarga simultáneamente. El DCS usa el nivel en los tanques descarga (U/F) alimentados por múltiples espesadores para controlar la secuencia de la respectiva válvula de alimentación de descarga del respectivo espesador, a fin de asegurar tasas de evacuación iguales de cada espesador. Estos bucles operan juntos para mantener la densidad de la descarga (U/F) y profundidad de lecho de espesador.

- Todos los espesadores emplean tanques de colección de solución rebose (colectores). La solución se bombea de estos tanques a la siguiente etapa del proceso utilizando una o dos líneas de transferencia con dos o tres bombas centrífugas, una o dos en operación y una de reserva. La excepción son los espesadores de la lixiviación neutra, que utilizan canaletas abiertas para transferir la solución de rebose a la planta de purificación. El control de nivel en los tanques de colección de rebose se implementa usando una válvula proporcional de control en la línea de descarga de bomba.

3.3.1. Lixiviación neutra

La calcina producida durante la tostación, se alimenta a los tanques de reacción de lixiviación neutra en donde se neutraliza una mezcla de soluciones provenientes del proceso goethita con solución ácida de retorno de la electrolisis (“spent”) y otras soluciones de retorno que contienen zinc. La acidez del “spent” de retorno de celdas varía de 190 a 210 g/l de ácido sulfúrico.

Las finalidades de la etapa de lixiviación neutra son:

- Disolver la mayor parte del óxido de zinc desde las calcinas de tostación por acción de la solución ácida de retorno de electrolisis. El ZnO (óxido de zinc) reacciona rápidamente con el H₂SO₄ (ácido sulfúrico) contenido en la solución del tanque cabeza, para formar una solución de sulfato de zinc, según la siguiente reacción:



- Lograr una pre-purificación férrica de elementos perjudiciales a electrolisis, tales como: arsénico, antimonio y germanio.

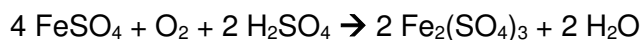
De igual modo ocurren reacciones similares con los óxidos de los otros elementos que como impurezas acompañan al zinc resultando en lo siguiente (Ver anexos – Diagramas de Pourbaix, pág. 55):

- CdSO_{4(aq)}
- CuSO_{4(aq)}
- NiSO_{4(aq)}
- In(SO₄)_{3(aq)}
- CoSO_{4(aq)}

El arsénico y antimonio presentes están en mayor parte como H₃AsO₃ - H₃AsO₄ y (SbO)₂SO₄ - Sb₂(SO₄)₃, y excepcionalmente como Sb₂O₅•XH₂O. El plomo y la plata como especies insolubles (PbSO₄ y Ag₂S/Ag⁰) y el germanio hidratado sobre el hidróxido férrico.

Respecto al hierro una parte se encuentra en estado reducido, sin embargo, debe haber suficiente Fe⁺⁺⁺ para precipitar adecuadamente: arsénico, antimonio y germanio.

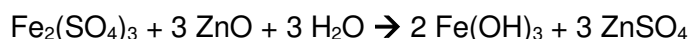
El hierro ferroso que se encuentra en solución tiene que ser oxidado por inyección de aire comprimido u oxígeno conforme a la reacción química siguiente:



Excepcionalmente, si la concentración de Fe^{++} (ion ferroso) incrementaría a más de 10 ppm, a la salida de lixiviación neutra, se adiciona solución de KMnO_4 (permanganato de potasio) y la reacción que ocurre es la siguiente:



La hidrólisis del ion férrico a hidróxido de hierro sigue la reacción química siguiente:



El hidróxido férrico $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ formado ofrece una gran superficie tipo gel y adsorbe algunas de las impurezas que pueden ser removidas de la solución. Este proceso de formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ co-precipita el arsénico, germanio y antimonio y se denomina purificación férrica.

El over-flow (solución clara) de los espesadores de la lixiviación neutra se bombea hacia la sección de purificación y el under-flow (pulpa de lodos) se bombea a los tanques de lixiviación ácida caliente (LAC 1).

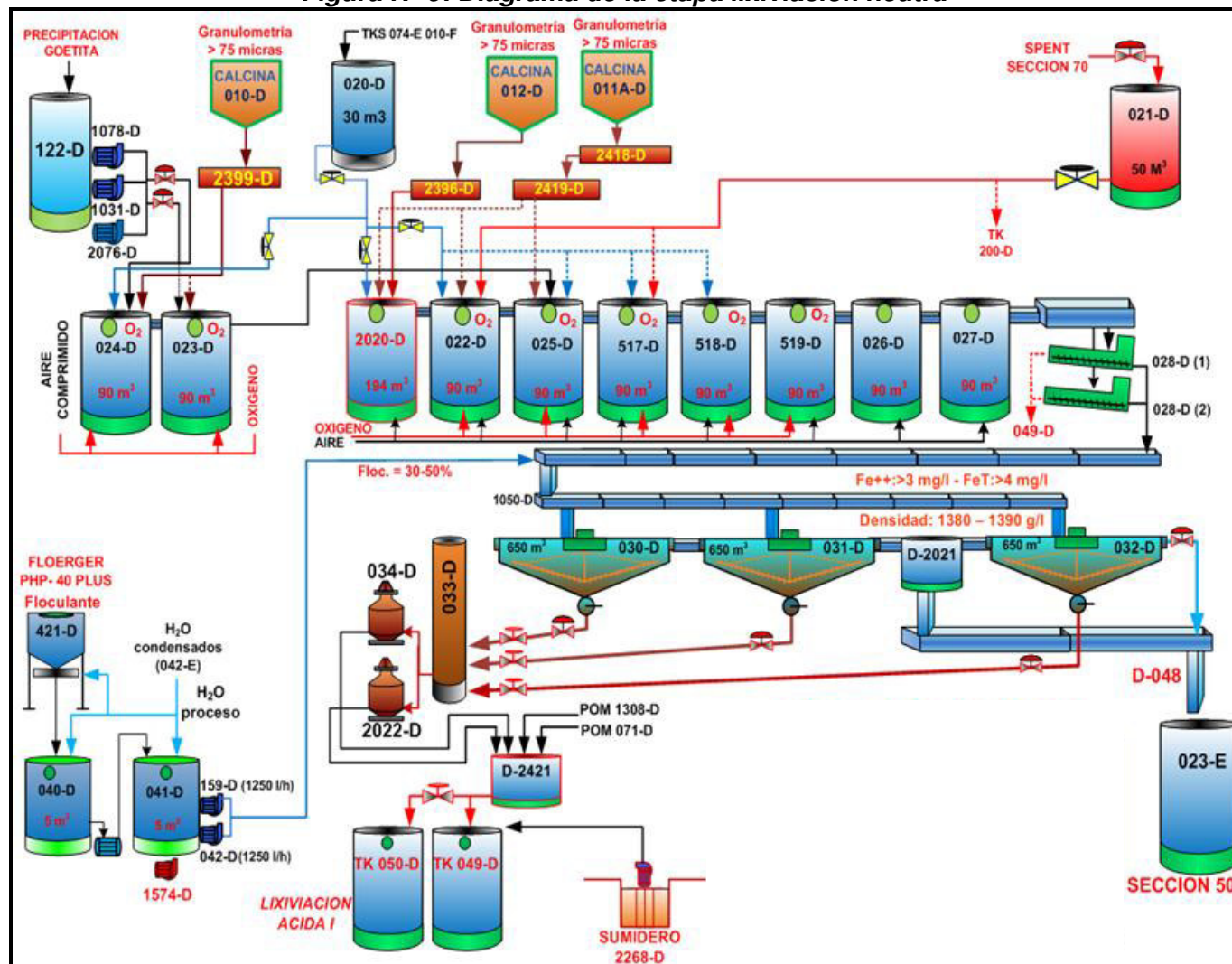
El control secuencial de pH es muy importante en esta etapa, según la tabla N° 5:

Tabla N° 5: Control secuencial de pH en cada tanque de la lixiviación neutra

Tanque	Límites de Especificación
pH TK D-024	4.2 +/- 0.1 (O/F de Goethita)
pH TK D-023	4.3 +/- 0.1 (O/F de Goethita)
pH TK D-2020	2.7 +/- 0.3
pH TK D-022	3.5 +/- 0.1
pH TK D-025	3.5 +/- 0.1
pH TK D-517	4.1 +/- 0.1
pH TK D-518	4.3 +/- 0.1
pH TK D-026	4.4 +/- 0.1
pH TK D-519	4.5 +/- 0.1
pH TK D-027	4.5 +/- 0.1

Fuente: Manual del Operador - Gerencia de Hidrometalurgia, Nexa Resources Cajamarquilla

Figura N° 9: Diagrama de la etapa lixiviación neutra



LEYENDA

Tolvas de almacenamiento y alimentación de óxido de zinc (calcina):

010-D, 012-D, 011A-D

Tanque de SPENT (solución agotada de electrólisis)

021-D

Etapa de precipitación de goethita:

122-D: Tanque de acondicionado.

024-D y 023-D: Tanques de lixiviación

Etapa de lixiviación Neutra

(Tanques de lixiviación)

2020-D, 518-D, 022-D, 519-D

025-D, 026-D, 517-D, 027-D

Espesadores de separación S/L

030-D, 031-D, 032-D

Etapa de lixiviación ácida caliente (LAC1)

D-2421 (cajón de colección de solución lixiviada).

050-D, 049-D (tanques de lixiviación ácida caliente)

Planta de dosificación de floculante:

421-D (tanque de almacenamiento de floculante)

040-D, 041-D (tanques de preparación y dosificación de floculante)

Etapa de Purificación (sección 50)

023-E

3.3.2. Lixiviación ácida caliente (LAC 1)

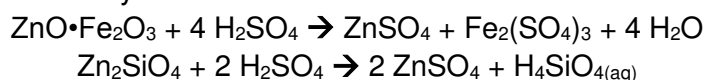
Los objetivos de la etapa de lixiviación ácida caliente son:

- En conjunto con la etapa de lixiviación súper ácida caliente (LAC 2), lixiviar los compuestos de zinc y hierro (mayormente ferritas) que no reaccionaron o disolvieron en la etapa anterior de lixiviación neutra, pre-neutra y precipitación de indio.
- Generar una solución medianamente alta en zinc, conteniendo prácticamente todo el hierro de la calcina consumida en las etapas de lixiviación neutra, pre-neutralización y precipitación de indio, para su posterior procesamiento en los circuitos de reducción ácida, Pre-neutralización, precipitación de indio y finalmente en la precipitación de goethita.

Las descargas (U/F) de los espesadores de la lixiviación neutra, pre-neutralización y relixiviación de indio se combinan con el rebose (O/F) de los espesadores de la etapa de LAC 2 (lixiviación súper ácida caliente) y con el lavado del residuo Pb/Ag dentro de una caja de distribución para alimentarse luego al primer tanque de la lixiviación ácida caliente (LAC 1). Cuando no opera la Planta de Indio el U/F de la re-lixiviación de indio se reemplaza por el U/F de la primera precipitación de indio para cerrar el circuito.

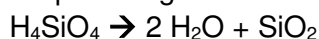
Para disolver las ferritas de zinc se requiere acidez y temperatura altas. La concentración de ácido en la descarga de la LAC 2 se mantiene en 120 g/L para lograr una concentración de ácido al final de la LAC 1 entre 30 y 60 g/L de H_2SO_4 . La descarga del espesador de lixiviación neutra también contiene pequeñas cantidades de sulfuros sin tostar, que se lixiviarán en los circuitos de LAC 1 y LAC 2.

Lixiviación de ferritas y silicatos:



El ácido orto-silícico es inestable en soluciones acuosas en función del pH. Esta es altamente inestable a pH's bajos y pH's altos y su máxima estabilidad usualmente se encuentra en los rangos de pH de 3.0 a 3.5.

El ácido orto-silícico se descompone según la ecuación:



La sílice precipita desde la solución como un polímero y de acuerdo a las condiciones de pH, temperatura, concentración de sílice disuelta, puede formar ya sea un material pseudo-cristalino o un gel altamente hidratado. Si se forma este último, la separación sólido/líquido de los residuos de lixiviación por sedimentación y filtración se hacen muy difíciles, de modo que la selección de condiciones de lixiviación para evitar esta situación son de importancia crítica. Generalmente los circuitos estándar de lixiviación pueden manejar la sílice si su

nivel es < 2.5 % en la calcina. Sobre este nivel, usualmente, se requieren configuraciones de proceso especiales.

Lixiviación de sulfuros:



La presencia de sulfato férrico en las soluciones de LAC 1 permite la disolución de las pequeñas cantidades de especies sulfurosas (ZnS) contenidas en los residuos de lixiviación que se alimentan a la LAC 1.

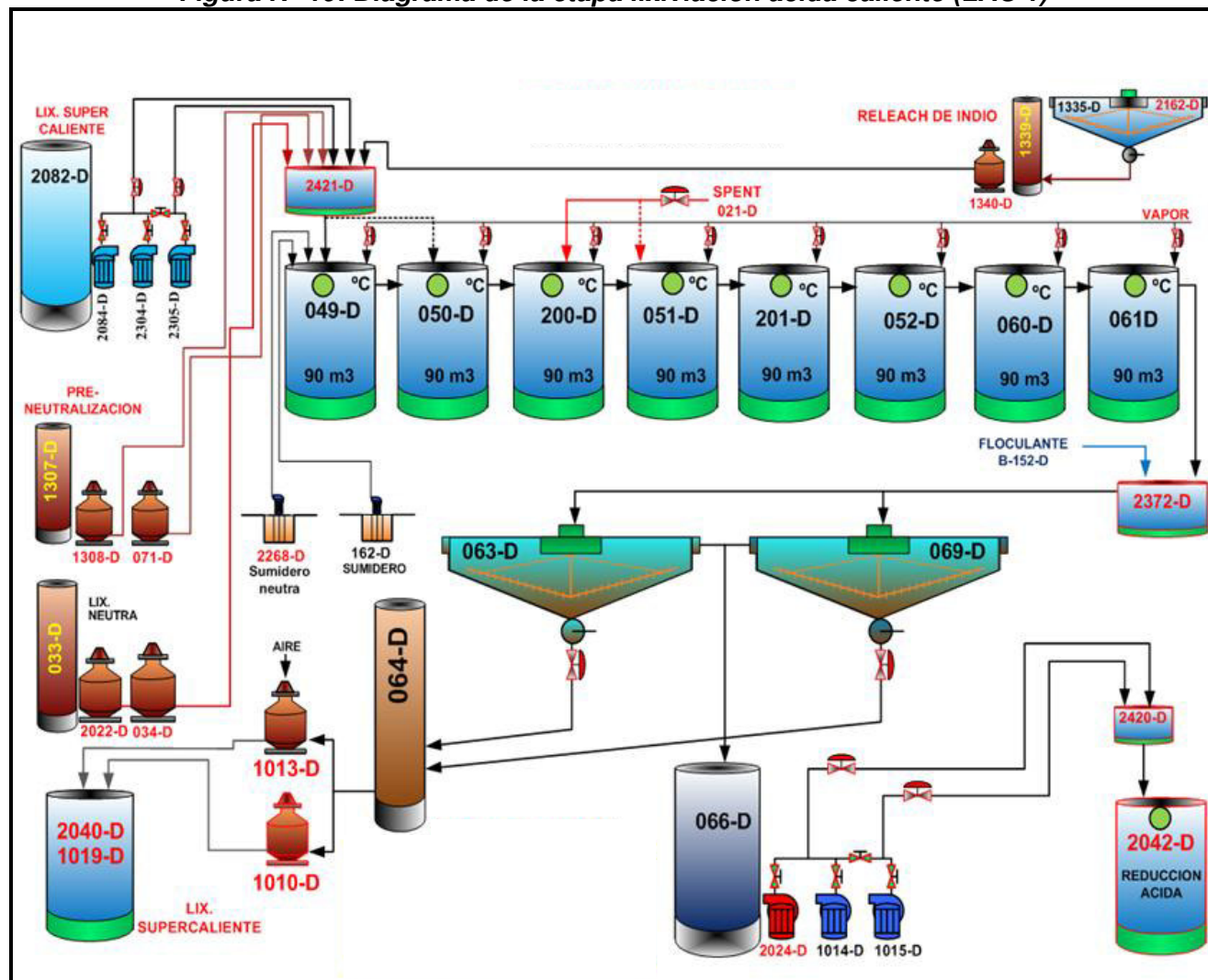
En esta etapa, los objetivos de niveles de acidez se logran controlando la acidez en la LAC 2, su acidez es consecuencia de esta etapa. Las concentraciones de ácido sulfúrico en el segundo tanque de lixiviación ácida 1 y en el rebose del espesador de lixiviación ácida se determinan manualmente cada dos horas.

El rango de temperatura en LAC 1 debe ser de 85° - 90° C. La temperatura de la solución entrante del espesador de lixiviación súper ácida caliente (LAC 2) debería mantener esta temperatura de las pulpas en este rango de temperatura, en caso contrario activarse el calentamiento por inyección directa de vapor.

El rebose del espesador de la LAC 1 (O/F) es recolectado en un tanque de rebose y transferido usando dos de tres (dos operando, una de reserva) bombas centrífugas a la reducción ácida. Esta es una solución de sulfato de zinc y sulfato férrico principalmente.

La descarga del espesador (U/F) es recolectada en un tanque de descarga y transferida al primer tanque de lixiviación súper ácida caliente usando dos bombas de pulpa neumáticas. La tasa de bombeo es ajustada para mantener la densidad de descarga y profundidad de lecho del espesador. El nivel en el tanque de descarga del espesador se mantiene automáticamente regulando el flujo de la descarga del espesador.

Figura N° 10: Diagrama de la etapa lixiviación ácida caliente (LAC 1)



LEYENDA

Etapa de lixiviación ácida caliente
(Tanques de lixiviación caliente)
049-D, 050-D, 200-D, 051-D, 201-D, 052-D, 060-D,
061-D

2421-D (cajón de recepción de carga)
Recibe:
2018-D (lixiviación súper ácida caliente)
1207-D (pre-Neutralización)
033-D (lixiviación neutra)
1335-D, 2162-D (relixiviación de indio)

2372-D (cajón de recepción de carga)

063-D, 069-D (espesadores de separación S/L)

2420-D, 2042-D (reducción ácida)

Fuente: Manual del Operador – Gerencia de Hidrometalurgia, Nexa Resources Cajamarquilla

3.3.3. Reducción ácida (RA)

Los objetivos de la etapa de Reducción Ácida incluyen:

- Reducción química de hierro férrico a hierro ferroso contenido en las soluciones de LAC 1. La concentración objetivo de Fe^{+++} al final de la etapa es $< 1.0 \text{ g/L}$.
- Producir un residuo de lixiviación lavado y de baja humedad para reciclarlo en el tostador.

El objetivo de la baja concentración de hierro férrico es deseable para maximizar la ley del preconcentrado de indio y minimizar la carga de hierro que va al circuito de recuperación de indio. En caso de que la planta de indio no opere, también se requiere una baja concentración de hierro férrico pues concentraciones mayores de hierro férrico originan una precipitación excesiva de hidróxido férrico y plumbojarositas en las etapas siguientes afectando negativamente las propiedades de separación S/L e incrementando la carga circulante de fierro.

La reducción química del hierro férrico se logra mezclando la solución de LAC 1 con pulpa de concentrado de zinc fresco (ZnS - sulfuros metálicos). La temperatura de esta etapa se mantiene entre 80° y 90°C , el ácido libre concuerda con el ácido libre en la solución de Lixiviación Ácida Caliente. La adición de concentrado es en base al estequiométrico, llegando a ser 1.5 veces dicho valor a fin de garantizar el contenido de Fe^{+++} a la salida de esta etapa.

La pulpa de concentrado de zinc se prepara en el Área 10 mezclando el concentrado fresco con la solución filtrada de los filtros de la reducción ácida. La pulpa se bombea hasta el tanque del almacenamiento ubicado en el Área 40 y desde este tanque se bombea a la etapa de reducción ácida como se requiera (cuando opera la planta de indio a su tanque de reducción).

La pulpa de los tanques de reducción ácida se envía al espesador. El O/F o rebose del mismo se bombea al filtro del tanque alimentador en la sección 10 (Concentrados). La pulpa U/F es filtrada en un filtro de membrana, a fin de minimizar el contenido de humedad en la torta de filtro. La torta de filtro se devuelve al área de mezcla de concentrado y se combina con otros concentrados para formar la alimentación del tostador.

La reacción química principal de la reducción ácida es prácticamente una lixiviación férrica de sulfuros:



Donde $\text{Me} = \text{Zn}, \text{Fe}$.

La pulpa de concentrado para la reducción se prepara mediante ratio del concentrado de zinc a la tasa del filtrado del filtro de reducción ácida. El proceso de mezcla es administrado por un controlador de secuencia continua

en el ABB DCS, quienes monitorean el flujo del concentrado (peso) el flujo del filtrado, el nivel del tanque de mezcla (densidad del tanque de mezcla) y ajusta la velocidad del transportador de alimentación del concentrado. Este controlador también administra la transferencia de la pulpa mezclada hacia el tanque de almacenamiento en el área 40 basado en el nivel del tanque de almacenamiento. El tanque mezclador activo que transfiere la bomba siempre funciona, cuando la pulpa no está siendo transferida hacia el tanque de almacenamiento en el área 40, es reciclada en el tanque de mezclado.

La temperatura en la reducción ácida se controla automáticamente por adición de vapor al primero y segundo tanque; además, existe provisión para monitorear la temperatura y agregar vapor manualmente al tercer tanque.

El O/F o rebose del espesador de reducción ácida se recolecta en un tanque de rebose y se bombea a la pre-neutralización. El flujo del tanque de rebose se regula para mantener un nivel constante en el tanque.

El flujo de U/F o descarga del espesador de reducción ácida es colectado en el tanque de flujo de descarga y transferido hacia el tanque de alimentación del filtro de reducción ácida en el área 10 usando una bomba neumática de pulpa. La tasa de bombeado es ajustada para mantener la densidad del flujo de descarga (U/F). El flujo del tanque de rebose es regulado para mantener un nivel constante en el tanque. Una segunda bomba neumática recicla el rebose del espesador a la cabeza del circuito de reducción ácida. Esta bomba es manualmente ajustada.

Cada uno de los dos filtros de reducción ácida es controlado por un PLC dedicado suministrado con la unidad. El PLC supervisa las operaciones del ciclo interno del filtro (definido por el vendedor) incluyendo la interface del panel de control local. Los eventos en cada ciclo operativo del filtro son idénticos.

Las operaciones de los dos filtros de reducción ácida se administran por un controlador de secuencia continua en el ABB DCS1. Este controlador monitorea cada ciclo de filtrado (vía comunicación con ambos filtros PLC's) y balancea los ciclos de filtración para maximizar el flujo a través de los filtros. Normalmente, un filtro estará alimentando mientras que el otro estará lavando, o esperando en reserva. El Balance de filtro también incorpora niveles de control del tanque de alimentación del filtro en común.

3.3.4. Pre-neutralización

Los objetivos de la etapa de pre-neutralización incluyen:

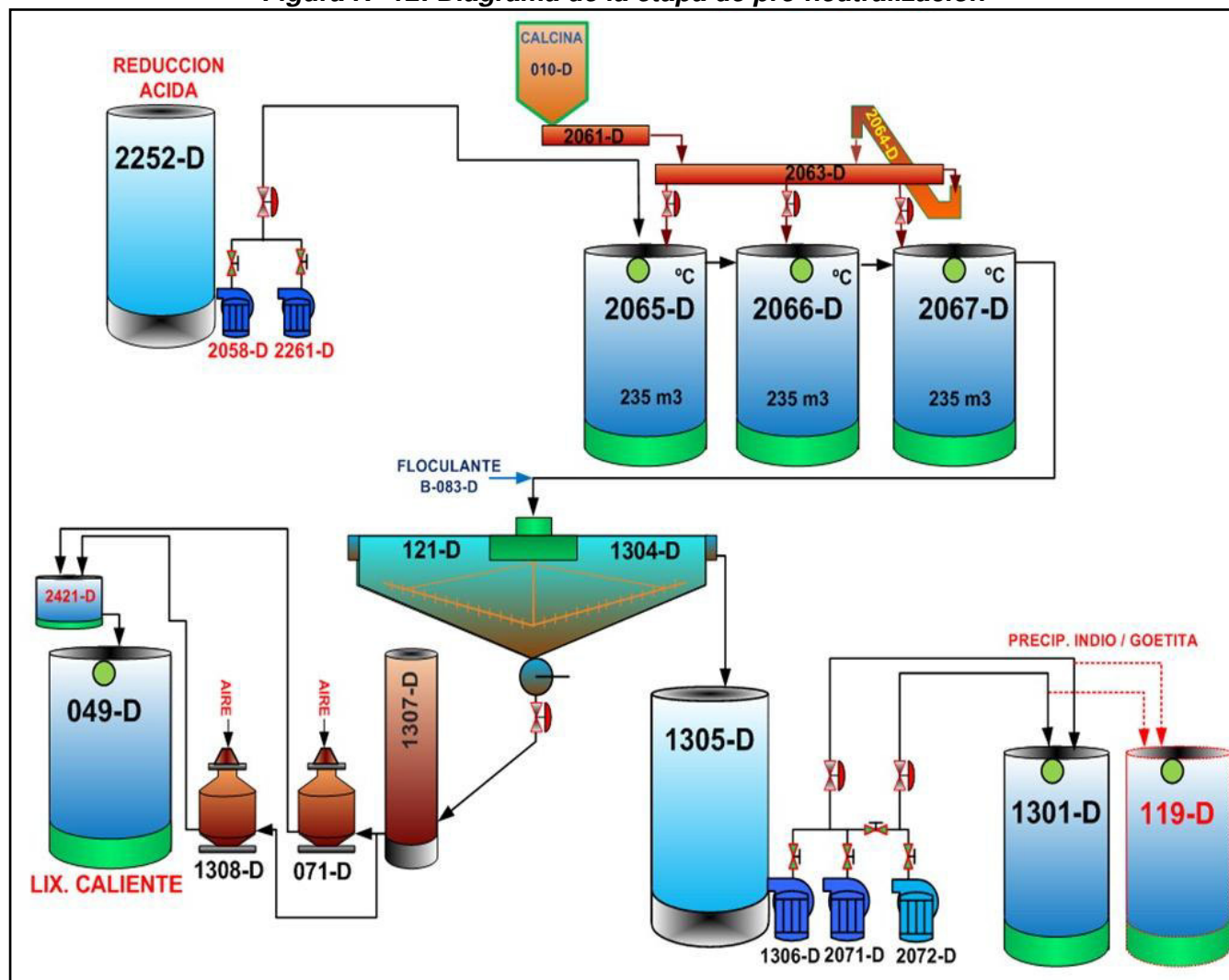
- Reducir la acidez del O/F de la etapa de reducción ácida para minimizar la cantidad de calcina necesaria para la precipitación de indio, maximizando así la ley del precipitado de indio.
- En caso que el circuito de recuperación de indio esté fuera de línea, el objetivo es reducir la acidez del rebose de reducción ácida para minimizar la cantidad de calcina necesaria para la precipitación de goethita, minimizando así las pérdidas de zinc en el residuo de goethita para una mayor recuperación global de zinc.

El objetivo de concentración de acidez libre final de esta etapa está entre 2 - 5 g/l, y para ello se controla el pH entre 2.6 y 3.0. Además, a una temperatura esperada para este proceso de 80° - 90°C. Debido a la temperatura de la etapa anterior no es necesaria la adición de vapor.

Las principales reacciones químicas en la pre-neutralización son similares a las de la lixiviación neutra y se orientan específicamente a la lixiviación de óxidos según: $\text{ZnO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$

La adición de calcina a los tanques de pre-neutralización se regula por pH usando válvulas de flujo discretas en el tubo de descarga del transportador que alimenta cada tanque. Controladores de pH especiales regulan la frecuencia relativa de las válvulas de flujo individuales que alimentan cada tanque para mantener el pH requerido y la temperatura se monitorea pero no se controla.

Figura N° 12: Diagrama de la etapa de pre-neutralización



LEYENDA

Etapa de Pre-neutralización
(Tanques de pre-neutralización)
2065-D, 2066-D, 2067-D

010-D (alimentación de caliza)

2252-D (solución de reducida de reducción
ácida)

121-D, 1304-D (espesadores de separación
S/L)

1305-D (tanque de recepción de O/F del
espesador)

1301-D (etapa de precipitación de indio)

119-D (etapa de precipitación de goethita)

1307-D (tanque de recepción del U/F del
espesador)

1308-D, 071-D (bombas neumáticas para

3.3.5. Precipitación de indio

Los objetivos de la etapa de precipitación de indio:

- Precipitar indio contenido en solución por hidrolisis mediante neutralización con calcina.
- En caso que la planta de indio se encuentre fuera de operación, acondicionar el pH de las soluciones de ingreso a la siguiente etapa de precipitación de fierro como Goethita entre 3.5 y 4.0 con la finalidad de minimizar el requerimiento de calcina y reducir las pérdidas de zinc.

El rebose (O/F) de la etapa de Pre-neutralización es tratado en cuatro tanques con agitación con la adición de calcina al primer y segundo reactores para alcanzar un pH final entre 3.5 – 4.0. Las reacciones alcanzan una temperatura de 85 °C.

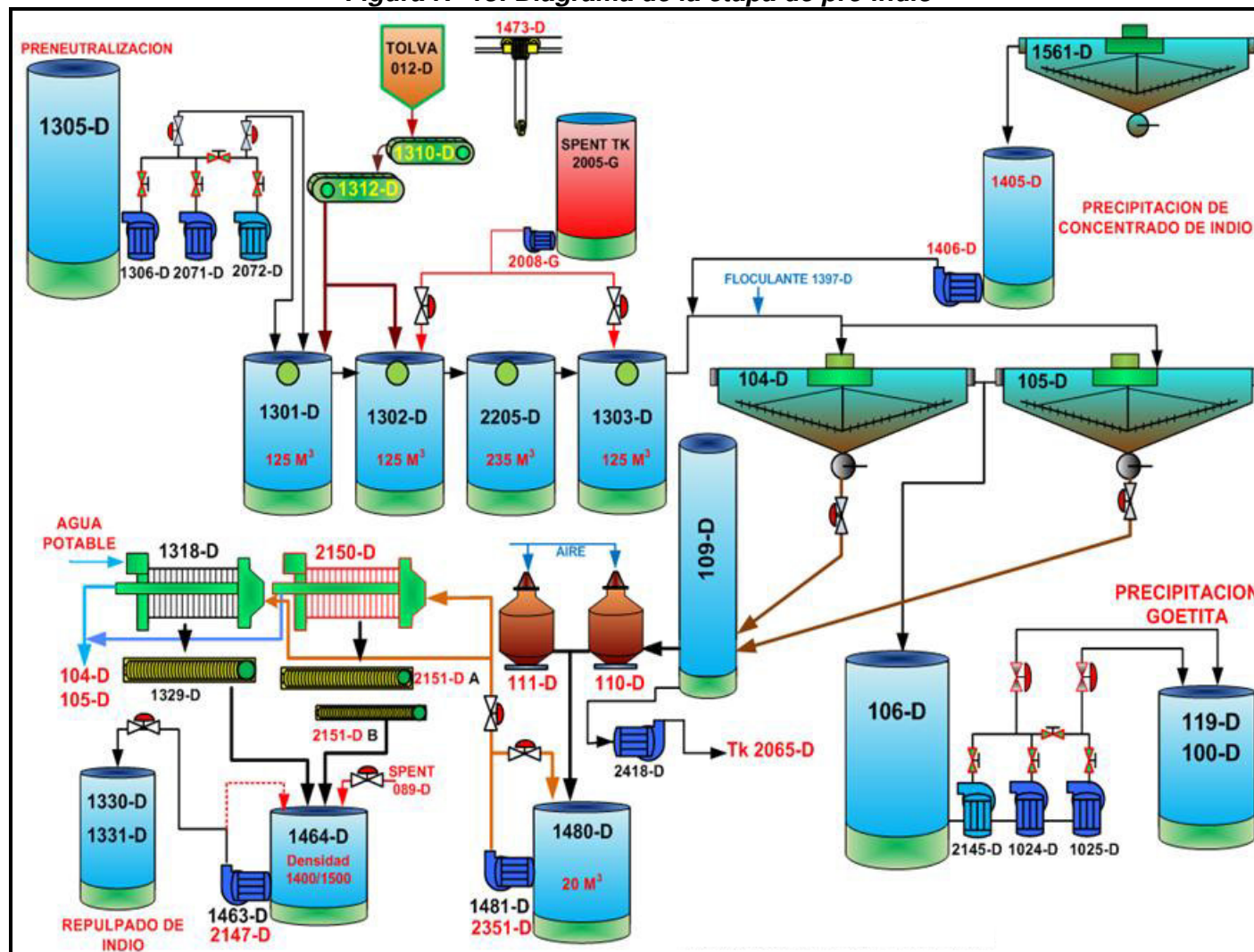
La pulpa resultante se envía a un espesador de 18 m de diámetro. La descarga (U/F) se filtra en un filtro prensa de placas recesadas semi-automático de 300 m², luego la torta se re-pulpa con electrolito agotado en un tanque con agitación y se trasfiere a la etapa de re-lixiviación de Indio.

Cuando no opera la planta de indio la descarga (U/F) se envía a la etapa de LAC 1. El rebose (O/F), en ambos casos, se envía a la etapa de precipitación de goethita.

Las principales reacciones químicas son:

- Formación de hidróxidos: $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{In}(\text{OH})_3 + 3 \text{H}_2\text{SO}_4$
- Neutralización del ácido: $\text{ZnO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$

Figura N° 13: Diagrama de la etapa de pre-indio



LEYENDA

Etapa de Pre-indio

(Tanques de pre-indio)

1301-D, 1302-D, 2205-D, 1303-D

012-D (alimentación de calcina)

2005-D (solución agotada de electrólisis "spent")

1305-D (tanque de recepción de O/F del espesador de pre-neutralización)

1561-D, 1405-D (etapa de precipitación de concentrado de indio)

104-D, 105-D (espesadores de separación S/L)

106-D (tanque de recepción del O/F del espesador)

119-D, 100-D (etapa de precipitación de goethita)

109-D (tanque de recepción del U/F del espesador)

111-D, 110-D (Bombas neumáticas de envío de lodos a etapa de filtración).

Fuente: Manual del Operador – Gerencia de Hidrometalurgia, Nexa Resources Cajamarquilla

3.3.6. Precipitación y filtración de goethita

El objetivo de la etapa de precipitación de goethita es separar el hierro como un residuo estable para su eliminación y almacenamiento (precipitado de hierro alternativo a la Jarosita).

La solución que se alimenta a esta etapa es normalmente el rebose O/F de la etapa de precipitación de indio, este o no operando la planta correspondiente. En ambos casos el hierro soluble en la alimentación esta sustancialmente en forma de hierro ferroso (Fe^{+2}). Se agrega calcina a los tanques de precipitación de goethita con el objetivo de mantener el pH requerido. Esta reacción de oxidación-precipitación simultánea, de precipitación de hierro como goethita, se logra con la inyección de oxígeno dentro de los reactores para oxidar el hierro ferroso (Fe^{+2}) a hierro férrico (Fe^{+3}). La oxidación del hierro ferroso a férrico en un ambiente de pH alto, promueve la precipitación del hierro como goethita, una forma de residuo de hierro que se asienta y filtra fácilmente además de su estabilidad para su almacenamiento.

La temperatura se controla entre a 80° y 90° C y el perfil de pH's como sigue la tabla N° 6.

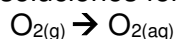
Tabla N° 6: Perfil de pH's de cada tanque en la etapa de precipitación y filtración de Goethita

Tanque	Límites de Especificación
pH TK D-119	3.5 – 3.7
pH TK D-100	3.0 – 3.1
pH TK D-101	2.9 – 3.0
pH TK D-120	2.9 – 3.0
pH TK D-102	2.9 – 3.0
pH TK D-521	2.8 – 2.9
pH TK D-103	2.8 – 2.9

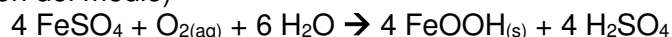
Fuente: Manual del Operador - Gerencia de Hidrometalurgia, Nexa Resources Cajamarquilla

Las principales reacciones en la etapa de precipitación de goethita son:

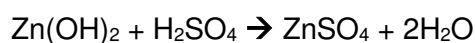
- Disolución del oxígeno en las soluciones ferrosas



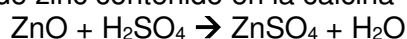
- Oxidación-precipitación de hierro con generación de ácido sulfúrico (acidificación del medio)



- La neutralización del ácido sulfúrico producido se logra con el uso de la torta de pH-7 conteniendo el zinc precipitado en la planta de tratamiento de efluentes

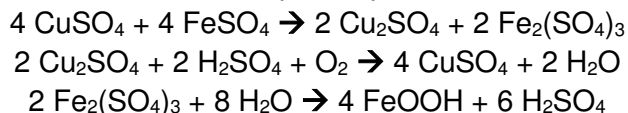


- O mediante el óxido de zinc contenido en la calcina

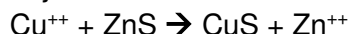


La presencia de ion cúprico (Cu^{++}) es muy importante ya que concentraciones $> 0.2 \text{ g/L}$ asegura una cinética de oxidación del ion ferroso (Fe^{++}) a ion férrico (Fe^{+++}), adecuada para los tiempos de residencia que se tienen en 6 de los 7 reactores de precipitación de goethita (“Know-how”).

El efecto catalizador del cobre se da por etapas secuenciales



La presencia de fases sulfuro, ya sea por altos contenidos de azufre en forma de sulfuros (S/S^-) en las calcinas ($> 0.40 \%$) o pase de sólidos por el rebose O/F del espesador de la etapa de reducción ácida, promueven la reducción de cobre en solución en el rango de pH de 3 a 4 (pre-neutralización y precipitación de indio) por su precipitación justamente sobre las fases sulfuro



Esta ausencia de cobre afecta sensiblemente la cinética de precipitación de goethita obligando a reducir el pH de las etapas anteriores con el consiguiente incremento de las pérdidas de zinc por el mayor uso de calcina en la etapa de goethita. (Ver árbol de pérdidas, pág. 37).

Temperatura sobre los 85°C y valores altos de pH y altos contenidos de cobre en solución, favorecen la precipitación de goethita con una remoción eficiente del hierro. La concentración de oxígeno en solución depende de la velocidad relativa de transferencia de masa del oxígeno gaseoso dentro de la solución y del consumo de oxígeno por la reacción química en sí misma.

La adición de calcina a los tanques de precipitación de goethita se controla automáticamente con la medición en línea del pH en el primer y segundo tanques. Simultáneamente se ingresa torta de pH-7 previamente filtrada y repulpada convenientemente para reducir el consumo de calcina.

Con la finalidad de disolver cualquier exceso de calcina (ZnO) se agrega electrolito gastado (“spent”) a los últimos dos tanques controlando el pH en 2.8 a fin de asegurar de no operar ningún tanque con un pH menor a 2.6 por posibles problemas de silicatos gelatinizados que puedan afectar drásticamente la filtración. El control conveniente de pH es requerido para optimizar la extracción de zinc sin afectar adversamente las características de configuración y filtración del residuo de goethita.

La inyección de oxígeno dentro de los tanques de precipitación de goethita para promover la oxidación y precipitación del hierro se efectúa por pulverización. La tasa de flujo de oxígeno para cada reactor de precipitación de goethita se relaciona al flujo de entrada y contenido de ion ferroso de la

solución de alimentación. El panelista ajusta manualmente la distribución de oxígeno en cada uno de los tanques. Se tiene prevista la adición manual de aire industrial en caso se corte el suministro de oxígeno. El hierro ferroso (Fe^{+2}) se mide cada hora en cada uno de los tanques de esta etapa para proporcionar retroalimentación al operador sobre los requerimientos de oxígeno.

El rebose O/F del espesador de la etapa de precipitación de goethita se recolecta en un tanque de rebose y se envía a la etapa de lixiviación neutra mediante una de dos bombas centrífugas. El flujo del tanque de rebose se regula para mantener el nivel en el tanque.

El flujo de U/F del espesador de la etapa de precipitación de goethita se recolecta en una columna de lodos y se bombea al tanque de alimentación de los filtros banda (D-2112 ó D- 2122) mediante un par de bombas neumáticas. La densidad y profundidad de lecho de espesador se mantienen regulando las tasas de bombeo de alimentación a los filtros banda.

Los filtros banda para este residuo están diseñados para alcanzar una eficiencia de lavado de 90%, siendo lo requerido en el filtrado de este residuo un contenido máximo de 2.0% de Zn soluble en agua.

3.3.7. Lixiviación súper ácida caliente (LAC 2)

Los objetivos de la etapa de lixiviación súper ácida caliente son:

- Disolver principalmente la mayor parte de las Jarositas formadas en la etapa de lixiviación ácida caliente (LAC 1).
- Completar la disolución de cualquier compuesto de zinc remanente que no fuera disuelto en la etapa de lixiviación ácida caliente (LAC 1).
- Producir un residuo conteniendo el plomo y la plata para su posterior tratamiento.

La pulpa U/F descargada del espesador de la lixiviación ácida caliente (LAC 1) se combina con electrolito gastado y ácido sulfúrico concentrado. Para maximizar la disociación de la mayor parte de las jarositas formadas durante la etapa de LAC 1 y la extracción del zinc remanente se requiere de una combinación de alta acidez final (120 g/L H₂SO₄) suministrada por el electrolito gastado ("spent"), ácido sulfúrico concentrado y una alta temperatura (> 95° C) suministrada por la inyección directa de vapor.

El "spent" de las succiones de celdas de las secciones 70, 73 y 75 (Planta de Electrólisis) se descargan en los dos últimos tanques de la LAC 2.

El rebose O/F del espesador de la LAC 2 se mezcla con el rebose del espesador de lavado de Pb/Ag y se retorna a la LAC 1. La descarga U/F del espesador se transfiere al tanque de mezcla de residuo de Pb/Ag usando una bomba de pulpa neumática.

Las principales reacciones químicas en la lixiviación súper ácida caliente son:

- Disociación de jarositas

$$\text{Pb}[\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]_2 + 6 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{PbSO}_4 + 3 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 12 \text{H}_2\text{O}$$

$$2 \text{AgFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 6 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Ag}_2\text{SO}_4 + 3 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 12 \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{In}_2[\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]_6 + 18 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{In}_2(\text{SO}_4)_3 + 9 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 36 \text{H}_2\text{O}$$
- Lixiviación de ferritas residuales

$$\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 4 \text{H}_2\text{O}$$
- Lixiviación de sulfuros residuales

$$\text{ZnS} + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + 2 \text{FeSO}_4 + \text{S}^0$$

Una óptima performance de esta etapa permite obtener residuos de plomo-plata con contenidos altos de Pb (> 10%) y Ag; y mínimos contenidos de Fe (< 4%), Zn (< 3%) e In (< 100 g/t).

En el primer, segundo y tercer tanque se implementan lazos de control de temperatura usando inyección directa de vapor vivo. Se puede agregar

manualmente vapor vivo al cuarto tanque, en el cual se monitorea la temperatura.

La alta acidez del rebose O/F del espesador de LAC 2 se mantiene mediante proporcionamiento manual de electrolito gastado al flujo de la pulpa de descarga del espesador de la LAC 1 en el primer y segundo tanques de LAC 2, basado en el muestreo periódico del rebose del espesador de LAC 2. También se agrega ácido sulfúrico concentrado al primer y segundo tanques de LAC 2 exclusivamente para mantener el balance de ion sulfato de toda la planta. La adición de ácido sulfúrico se ajusta desde el panel de control usando una válvula remota de control de flujo en la línea de alimentación por gravedad del tanque de cabeza de ácido concentrado D-2389. Los operadores monitorean manualmente los parámetros de operación claves para el espesador de LAC 2 cada dos horas.

El rebose O/F del espesador de lixiviación súper acida caliente es recolectado en un tanque de rebose compartido con el O/F del espesador de lavado del residuo Pb/Ag.

3.3.8. Lavado del residuo plomo/plata

El objetivo de esta etapa es:

- Recuperar el zinc soluble contenido en la pulpa U/F de descarga del espesador de lixiviación súper ácida caliente o LAC 2.
- Generar un pre-concentrado de Pb/Ag lavado adecuadamente para tratamiento posterior a fin de producir un concentrado de alta ley y recuperación de Ag.

La descarga U/F del espesador de LAC 2 y el filtrado del filtro banda de Pb/Ag y/o “Larox” se combinan en el tanque de mezcla de residuo Pb/Ag. Luego se descarga la pulpa dentro del espesador de lavado de Pb/Ag.

El rebose O/F del espesador de lavado de plomo/plata se combina con el rebose del espesador de LAC 2 en un tanque de rebose común y se retorna al primer tanque de la LAC 1, usando dos de tres (dos operando, una de reserva) bombas centrífugas. La descarga U/F del espesador de lavado de Pb/Ag se bombea del tanque de alimentación a los filtros banda y Larox. Los operadores monitorean los parámetros de operación claves para el espesador cada cuatro horas.

El filtro banda de 84 m² y el filtro existente de presión de placas horizontales Larox de 38 m² se operan en paralelo para procesar toda la pulpa de residuo de plomo/plata.

El filtro banda usa un ancho de filtrado de 4 m de ancho. La alimentación del tanque de alimentación al filtro fluye a dos canales de distribución, que abarcan el ancho de la banda al frente del filtro. El exceso de pulpa del tanque de alimentación de filtro rebosa en el tanque D-064 de alimentación de filtro de Pb/Ag intermedio.

La torta del filtro de banda pasa por un lavado primario y un lavado secundario. Para el lavado de torta primario se usa agua caliente (70°C) del tanque de lavado de filtro banda de Pb/Ag. El filtrado del lavado de torta primario es recolectado en el tanque de filtrado secundario y se usa para el lavado de torta secundario. La torta lavada se combina con agua recolectada del lavado de banda y tela y se descarga en el tanque de repulpeo de torta de filtro banda de Pb/Ag por un chute. La torta repulpada de este tanque se bombea al área 41 (Flotación de Pb/Ag) para posterior recuperación de la plata como un concentrado.

Los filtrados primario y secundario se recuperan en dos depósitos que descargan en los tanques de filtrado primario y secundario respectivamente. El filtrado primario se recicla al tanque de mezcla de residuo de Pb/Ag. El filtrado secundario se usa como un lavado secundario de torta para mejorar la eficiencia de recuperación. Se provee una opción para enviar filtrado secundario directamente a la primera etapa de tratamiento de efluente.

Hay dos depuradores y dos ciclones situados entre las cajas de vacío del filtro y la bomba de vacío para condensar vapor de agua y remover solución atrapada. El agua del depurador es recolectada en el tanque de lavado de filtro de banda Pb/Ag. El agua de sello de bomba de vacío es recolectada en un sumidero y luego bombeada al tanque de lavado del filtro banda de Pb/Ag o a los filtros banda de goethita (D2122 o D2102).

El agua recolectada en el tanque de lavado de filtro banda Pb/Ag se usa para lavar la tela y banda del filtro y proveer agua de lavado de torta. Se usa agua cruda fresca para lubricar los deslizadores de banda y la caja de vacío.

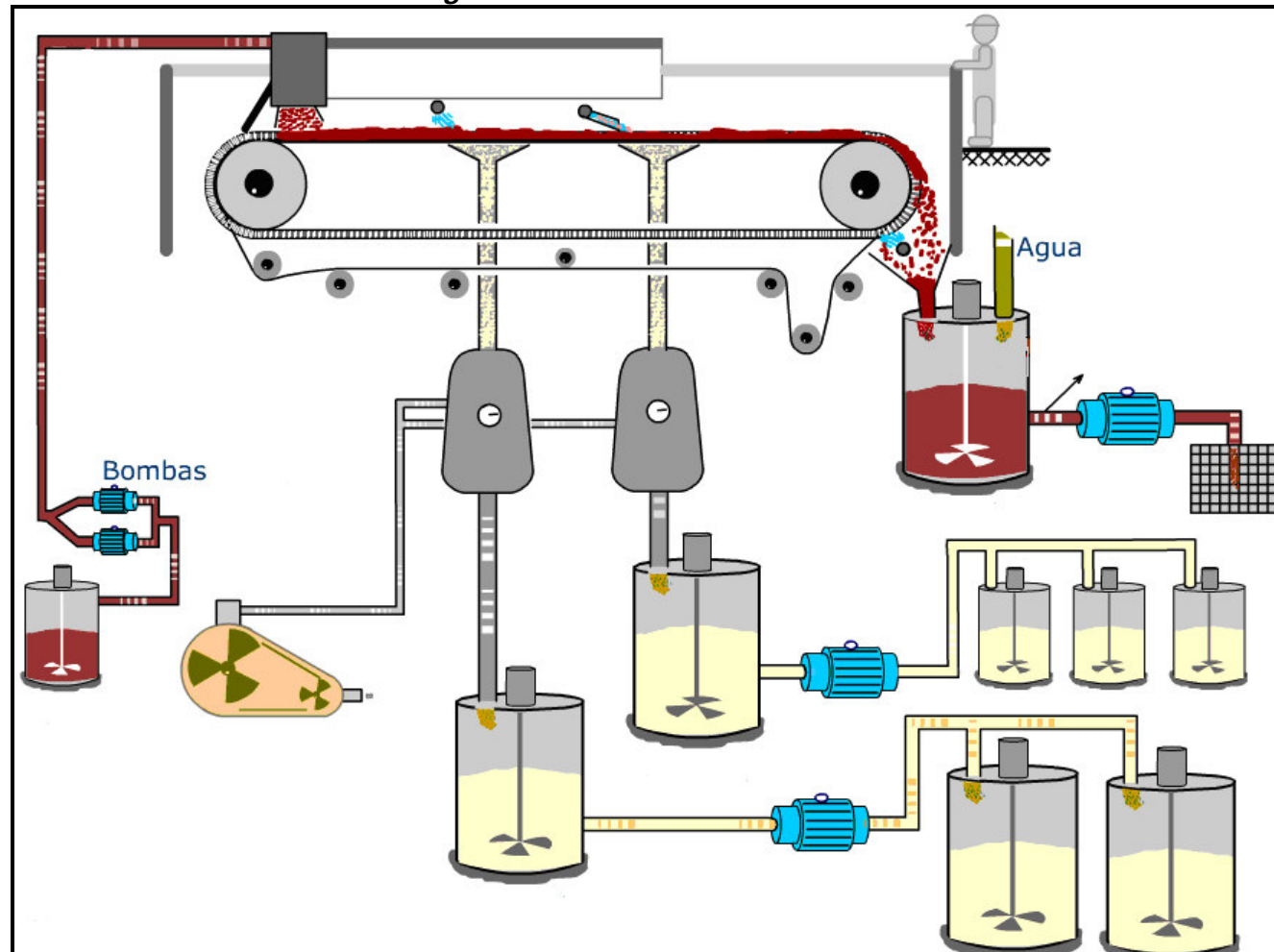
El filtro Larox usado para filtración del residuo de Pb/Ag es un filtro a presión totalmente automático con capacidad de lavado de torta y tela. El filtrado de los pasos de filtración y lavado de torta del filtro Larox pasa por un tanque de separación para remover el aire atrapado antes de que se recolecte la solución en un tanque de filtrado. El filtrado se bombea luego de retorno al tanque de mezcla de residuo de Pb/Ag.

Para lavar la torta del filtro Larox se usa agua cruda o condensado. Se usa una pequeña cantidad de agua cruda para lavado de tela, que se recolecta en el tanque de repulpado. También se agrega agua cruda a los apelmazadores para facilitar el repulpado.

La torta del filtro Larox se descarga directamente del filtro por un chute a un tanque de repulpado. La densidad de pulpa en este tanque se mantiene agregando agua cruda a los apelmazadores de recolección. La pulpa de residuo repulpado se bombea al espesador de alimentación de flotación Pb/Ag en el Área 41 (flotación Pb/Ag) para tratamiento posterior.

Uno de los dos filtros de tambor existentes (D073) permanecerá como respaldo para la filtración de Pb/Ag, a fin de evitar la acumulación de sólidos en el sistema de lixiviación.

Figura N° 16: Filtro banda de vacío



Fuente: Manual del Operador – Gerencia de Hidrometalurgia, Nexa Resources Cajamarquilla

CAPITULO IV

4.1. DESARROLLO DEL PROYECTO SEIS SIGMA

En este proyecto se busca incrementar la recuperación de zinc, optimizar el rango de trabajo de las variables y estandarizar los parámetros de control en el proceso de lixiviación, representado en una ganancia monetaria que se verá reflejado en la compra y adquisición de concentrados sulfurados de zinc, utilizando métodos estadísticos de seis sigma.

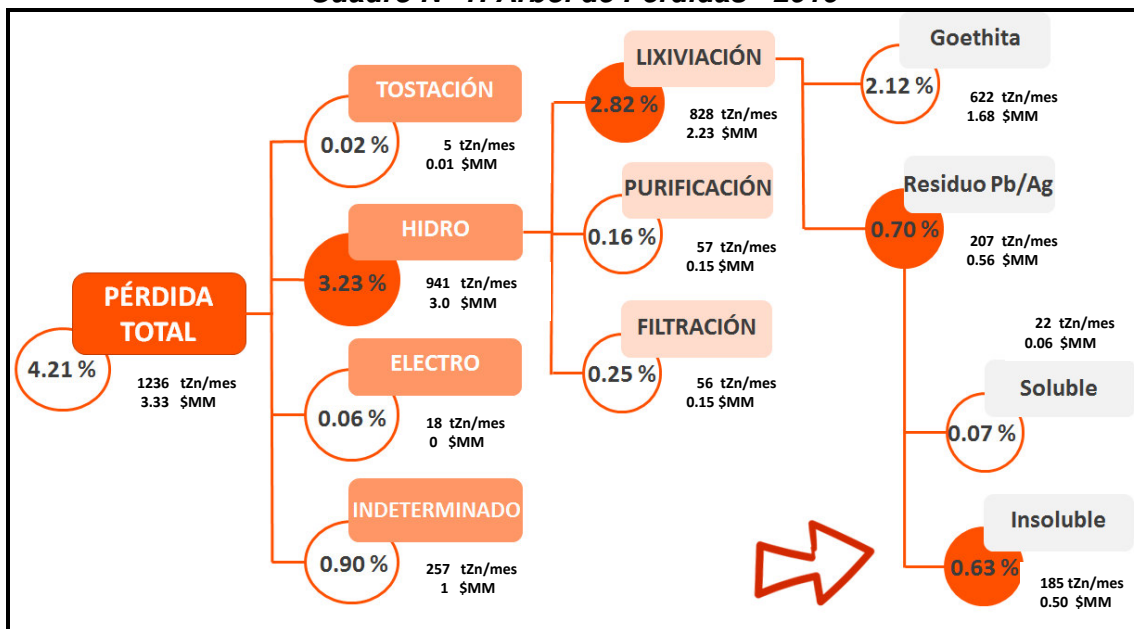
4.1.1. 1ra Etapa – Definir.

Esta etapa de la metodología seis sigma es un análisis básico del proceso en el cual se define el problema y cuál es la característica crítica de calidad para el cliente (CTQ) (¿qué es crítico para el cliente?).

4.1.1.1. Problema:

El porcentaje de zinc insoluble (ZnIW) contenido en el residuo Pb/Ag es una de las principales pérdidas del proceso de lixiviación, y como se puede observar en el cuadro N° 1, solo la etapa de lixiviación tiene una pérdida del 2.82%, esta información muestra las sub etapas del proceso que son “Precipitación de Goethita” y “Residuo Pb/Ag”, se descarta la posibilidad de trabajar en el proceso de precipitación de goethita porque se tiene encaminado un proyecto de migración al proceso de “Jarosita”, es por ello que se enfoca la recuperación de zinc presente en el ZnIW del residuo Pb/Ag, que evidencia una pérdida de 0.63%.

Cuadro N° 1: Árbol de Pérdidas - 2016

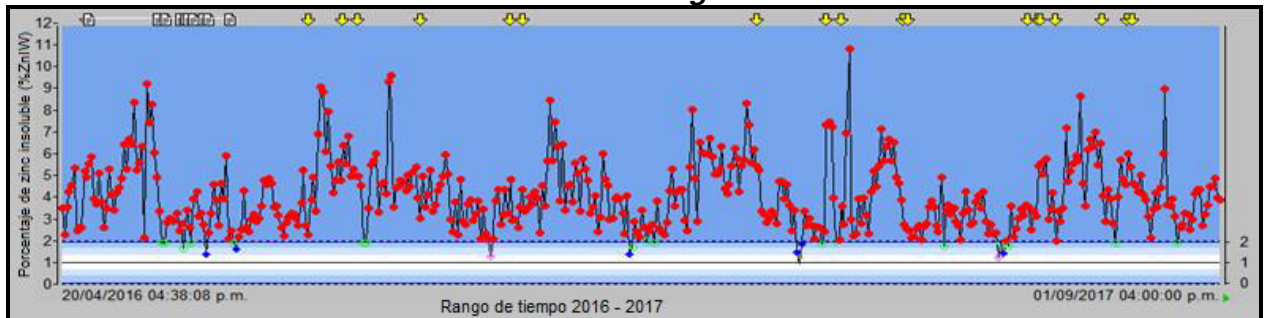


Fuente: Gerencia de Desarrollo de Operaciones Perú – Brasil. Nexa Resources.

Dentro de la distribución de pérdidas, se tomó información histórica de Abril del 2016 a Septiembre del 2017, como lo muestra el gráfico N° 1,

el cual según la especificación técnica del padrón de procesos de esta etapa, este indicador debe presentar una variación por debajo de 2%, sin embargo la información obtenida brinda una media de 3.9%, por lo que se identificó una gran oportunidad de mejora.

Gráfico N° 1: % ZnIW en el residuo Pb/Ag – Período 2016 - 2017



Fuente: Process Book (PI) – KPI: ZnIW Residuo Pb/Ag. Nexa Resources Cajamarquilla.

Para ello, se revisó datos históricos del impacto del ZnIW del residuo Pb/Ag, el cual se presenta como un KPI (key performance indicator) para el cálculo de la recuperación de zinc (Ver Anexos: Representación gráfica de los indicadores clave de proceso (KPI) que afectan directamente a la recuperación de zinc).).

En este gráfico observamos los indicadores que impactan en la recuperación de zinc, tanto positiva como negativamente, donde se ve reflejado en un Balance Metalúrgico mensual y acumulado. (Ver Anexos: Balance Metalúrgico).

4.1.1.2. Objetivo:

Reducir el porcentaje de pérdidas de Zinc en el residuo Pb/Ag de una media de 3.9% a 2.81%, lo que conlleva a obtener una ganancia de \$ 1.03 MM de dólares.

4.1.1.3. Calendario del Proyecto:

El Proyecto se inició en julio del 2017 y finalizó en febrero del año 2018.

4.1.2. 2da Etapa – Medir.

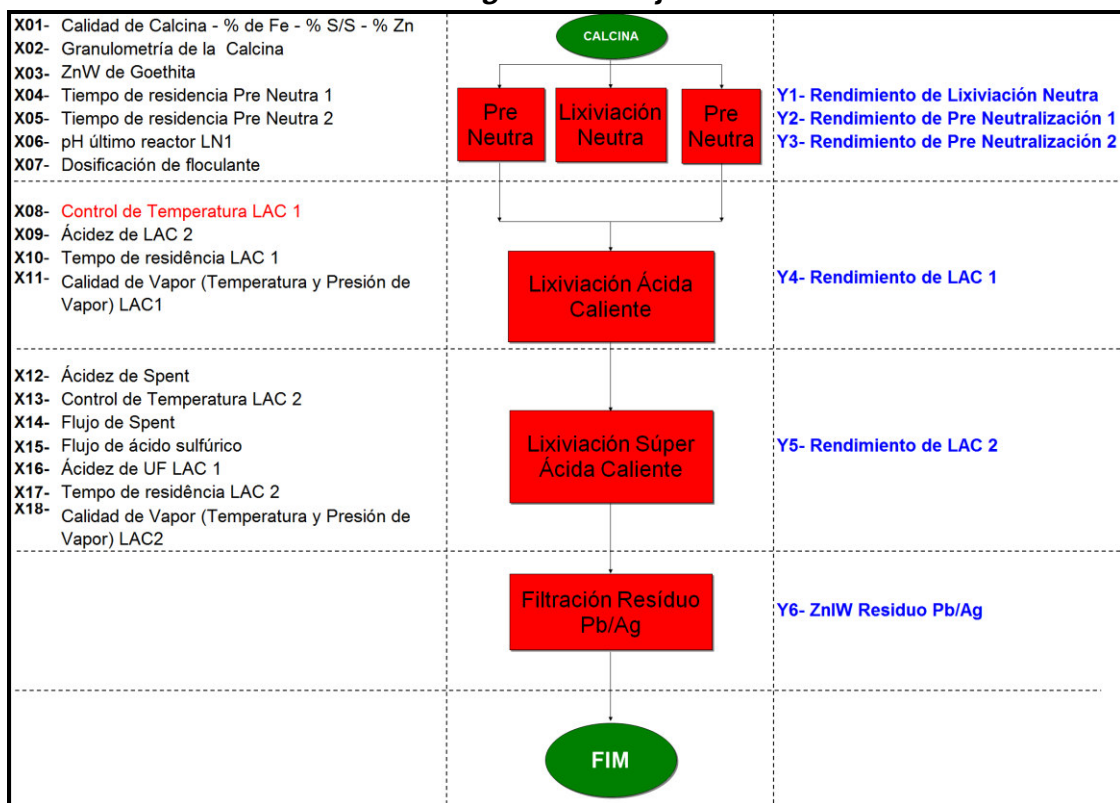
En la etapa de medir se especifica cual es la característica crítica de calidad interna (traducir lo que quiere el cliente al lenguaje de la organización) (Y), definir que es defecto para el proyecto y se valida el sistema de medida, Entrada (X) → Proceso → Salida (Y)

Las variables que deben medirse son aquellas importantes para el negocio como: características del producto, contenido de mano de obra, tiempo de ciclo, materiales, etc., así como todo lo que sea rentable mejorar y las que sean necesarias para garantizar que las mejoras sean duraderas.

4.1.2.1. Diagrama de Flujo:

En el cuadro N° 2 se muestra el diagrama de flujo para el proceso de Lixiviación, el cual detalla las variables de cada una de las sub etapas, tanto variables de entrada (X's) como de salida (Y's).

Cuadro N° 2: Diagrama de flujo de Lixiviación



Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Metodología Six Sigma. Nexa Resources Cajamarquilla.

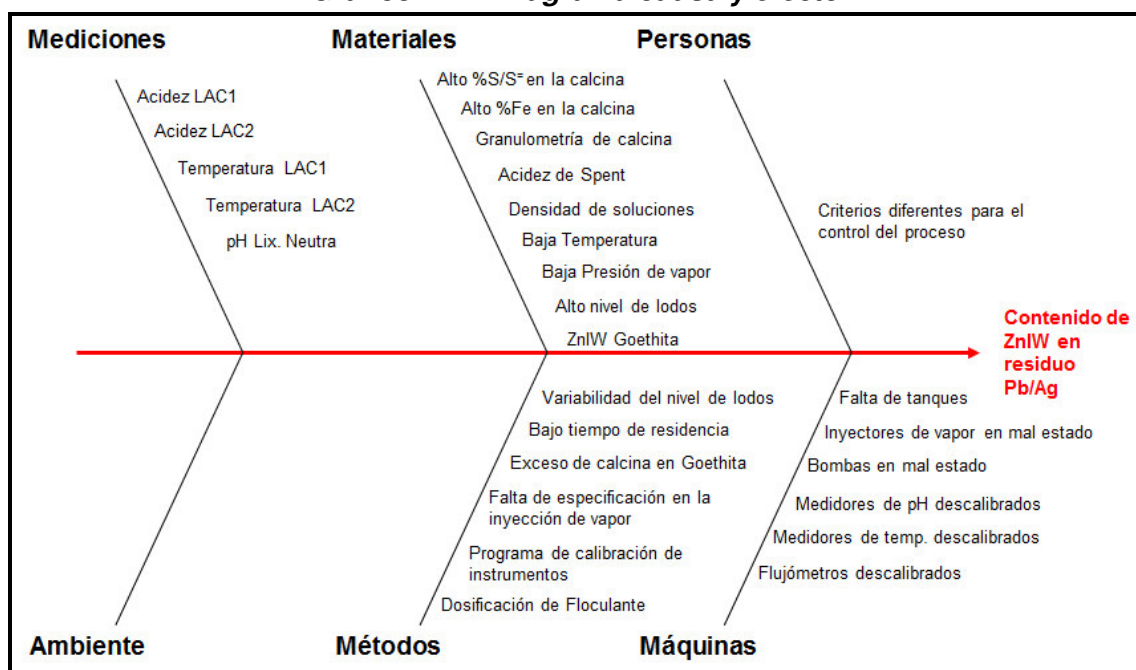
4.1.2.2. Diagrama causa y efecto:

El propósito de este diagrama es presentar un listado de las X's, las cuales después de ser procesadas se convierten en Y's. Dependiendo de las entradas que tenga el proyecto será el resultado obtenido. La mejora en los resultados, consiste en cambiar algunas X's críticas; estas son posteriormente evaluadas en las siguientes etapas del proyecto.

El diagrama causa y efecto que muestra el gráfico N° 2, muestra detalles elementales como lo es el control de la temperatura, causa en forma directa o indirecta de varios problemas del proceso o X's.

Estos datos fueron obtenidos de una lluvia de ideas realizada con el equipo del proyecto junto con operadores y supervisores del área, para asegurar la veracidad de la información.

Gráfico N° 2: Diagrama causa y efecto



Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Metodología Six Sigma. Nexa Resources Cajamarquilla.

4.1.3. 3ra Etapa – Analizar

En esta etapa, se mide la capacidad actual; a través de cualquier herramienta estadística que permita detectar la fuente de variación, se analizan los datos con detalle y se identifican las variables que causan variación en el proceso (X1, X2,...Xn).

4.1.3.1. Matriz de Priorización del Proceso:

En base al diagrama de causa y efecto, se introducen las X's identificadas en la columna correspondiente del formato de la matriz de priorización, mostrado en el cuadro N° 3. Luego lo mismo con las Y's que el equipo consideró las más importantes, ordenando estas en cuanto a importancia, dependiendo de la prioridad o impacto que tenga cada una, se obtiene alta ponderación en el entrenamiento del personal.

Cuadro N° 3: Matriz de priorización del proceso de lixiviación

MATRIZ DE PRIORIZACIÓN DEL PROCESO:		PROBLEMA PRIORITARIO (Y's)														TOTAL
PESO	X	VARIABLES	Y6- ZnIW Residuo Pb/Ag													
			Julio Vargas	Daniel Carbonel	Paolo Lermo	Edgar Carrero	Merly Lopez	Renzo Alvarado	Elmer Ponce	James Valdivia	Eloy Fernandez	Jorge Villalobos	Pedro Bravo	Victor Torres	Jose Macasi	
CAUSA POTENCIAL (X's)	X01- Calidad de Calcina - % de Fe - % S/S - % Zn	LAC1	1	3	1	3	1	3	3	3	3	1	1	1	1	360
	X02- Granulometria de la Calcina		3	3	3	3	5	3	5	1	5	3	1	3	1	561.6
	X03- ZnW de Goethita		1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	216
	X04- Tiempo de residencia Pre Neutra 1	LAC2	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	273.6
	X05- Tiempo de residencia Pre Neutra 2		1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	216	
	X06- pH último reactor LN1		3	1	1	1	3	1	3	1	3	1	3	1	331.2	
	X07- Dosificación de floculante	LAC1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	1	302.4
	X08- Control de Temperatura LAC 1		3	3	5	3	3	5	1	1	3	1	3	1	532.8	
	X09- Ácido de LAC 2		5	5	5	5	3	5	5	3	5	3	5	3	792	
	X10- Tempo de residencia LAC 1	LAC2	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	273.6
	X11- Calidad de Vapor (Temperatura y Presión de Vapor) LAC1		1	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	5	331.2
	X12- Ácido de Spent		3	5	3	5	5	3	3	5	5	5	3	5	3	763.2
	X13- Control de Temperatura LAC 2	LAC1	5	5	5	3	5	3	3	5	3	5	5	3	5	792
	X14- Flujo de Spent		5	3	1	5	3	3	1	3	3	1	3	1	3	504
	X15- Flujo de ácido sulfúrico		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	187.2
	X16- Ácido de UF LAC 1	LAC2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	216
	X17- Tempo de residencia LAC 2		3	1	1	3	3	5	3	3	1	3	5	5	3	561.6
	X18- Calidad de Vapor (Temperatura y Presión de Vapor) LAC2		3	3	3	1	1	3	5	5	3	5	3	5	3	619.2

LEGENDA:

5 - Correlación Fuerte

3 - Correlación moderada

1 - Correlación baja

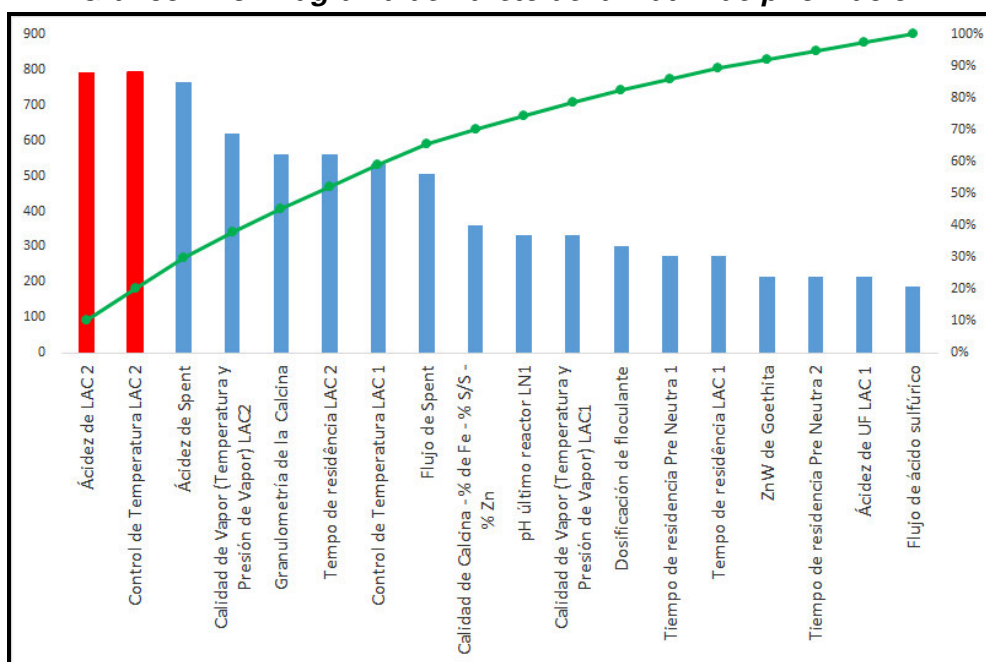
0 - Correlación ausente

LEGENDA: 5 - Correlación Fuerte 3 - Correlación moderada 1 - Correlación baja 0 - Correlación ausente

Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Metodología Six Sigma. Nexa Resources Cajamarquilla.

Esta herramienta muestra diversas causas posibles. De estas nos concentramos en las dos más importantes representadas de color rojo según el diagrama de "Pareto" que muestra el gráfico N° 3, mediante la evaluación realizada según criterios y capacidades tanto del equipo de trabajo como del personal operativo, verificando diferentes factores en la siguiente etapa de análisis.

Gráfico N° 3: Diagrama de Pareto de la matriz de priorización



Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Metodología Six Sigma. Nexa Resources Cajamarquilla.

4.1.3.2. Matriz de Esfuerzo e Impacto:

Esta es una herramienta que permite resumir visualmente el pro y contra de posibles soluciones al problema que estamos estudiando; nos permite establecer prioridades al momento de escoger la solución más adecuada tomando en cuenta dos criterios: a) nivel de dificultad para implementar la solución, y b) nivel de impacto de beneficios al momento de resolver el problema. El cuadro N° 4 muestra la matriz de esfuerzo e impacto según la priorización de variables.

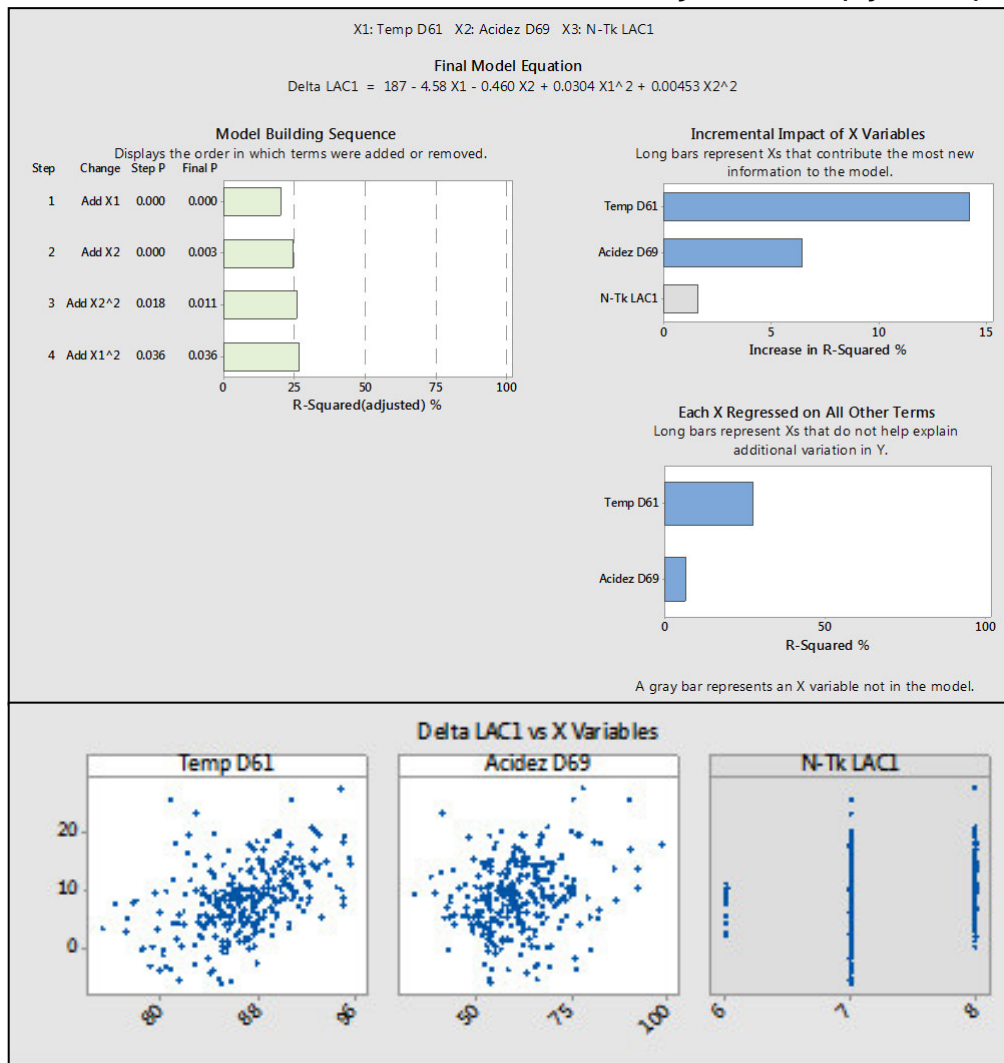
Cuadro N° 4: Matriz de esfuerzo e impacto del proceso

		MATRIZ DE ESFORÇO X IMPACTO DO PROCESSO			
ESFORÇO	ALTO	X04 - Tempo de residência Pre Neutra 1 X05 - Tempo de residência Pre Neutra 2 X16 – Acidez em UF LAC1	X01- Qualidade ustulado - % de S X09- Ácidez LA 2 X11- Qualidade de Vapor LA1 X12- Ácidez de Spent X17- Tempo de residência LA 2 X18- Qualidade de Vapor LA 2	ALTO	
	BAIXO	X04 – ZnW de Goethita X10 – Tempo de residência LAC1 X15 – Fluxo de ácido sulfúrico	X02- Granulometría de la Calcina X06- pH último reactor LN1 X07- Dosificación de floculante X08- Control de Temperatura LA 1 X13- Control de Temperatura LA 2 X14- Fluxo de Spent X16- Acidez em OF LA 1	BAIXO	
		BAIXO	ALTO		
		IMPACTO			

Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Metodología Six Sigma. Nexa Resources Cajamarquilla.

correlación por lo que se trabajara con las variables de Temperatura del último tanque de la LAC1 y la acidez en el espesador de la LAC1.

Gráfico N° 4: Correlación de variables con mayor R-cuad (Ajustado)

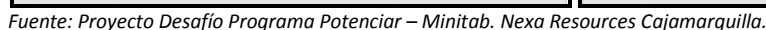


Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

El objetivo de esta etapa es confirmar las variables clave y luego cuantificar el

Luego de haber identificado las variables que impactan a reducir el % de ZnIW

Gráfico N° 5: Comparación gráfica del comportamiento del %ZnIW con las



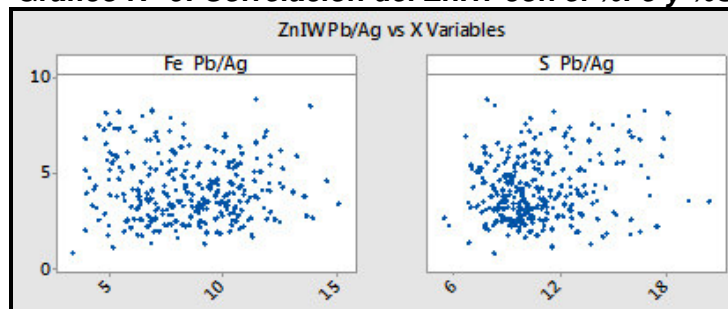
La primera tendencia muestra el comportamiento del % de ZnIW del año 2017 en períodos mensuales, donde el período N° 1, que corresponde a los meses de mayo y junio, se trabajó con los mejores resultados por efecto de un bajo porcentaje de sulfuros de zinc, por ello es que el %ZnIW se mantiene en 3%, sin embargo en el mes de julio se observa un incremento del %ZnIW, esto causado por un descontrol en los sulfuros de zinc.

En el período N° 2, correspondiente a los meses de agosto y septiembre, se considera una mejora en el %ZnIW debido a que el porcentaje de ferritas de zinc ha caído, esto quiere decir que se está logrando disolver el zinc presente en las ferritas.

Y por último, en el período N° 3, se observa que hay un incremento en el residuo Pb/Ag por efecto de un elevado incremento de los sulfuros de zinc presentes en el proceso.

Estas dos variables analizadas tienen una correlación del 12% para ambos casos, el cual se evidencia con el gráfico N° 6, donde se logra identificar la participación porcentual de cada variable en el comportamiento del ZnIW en el residuo Pb/Ag.

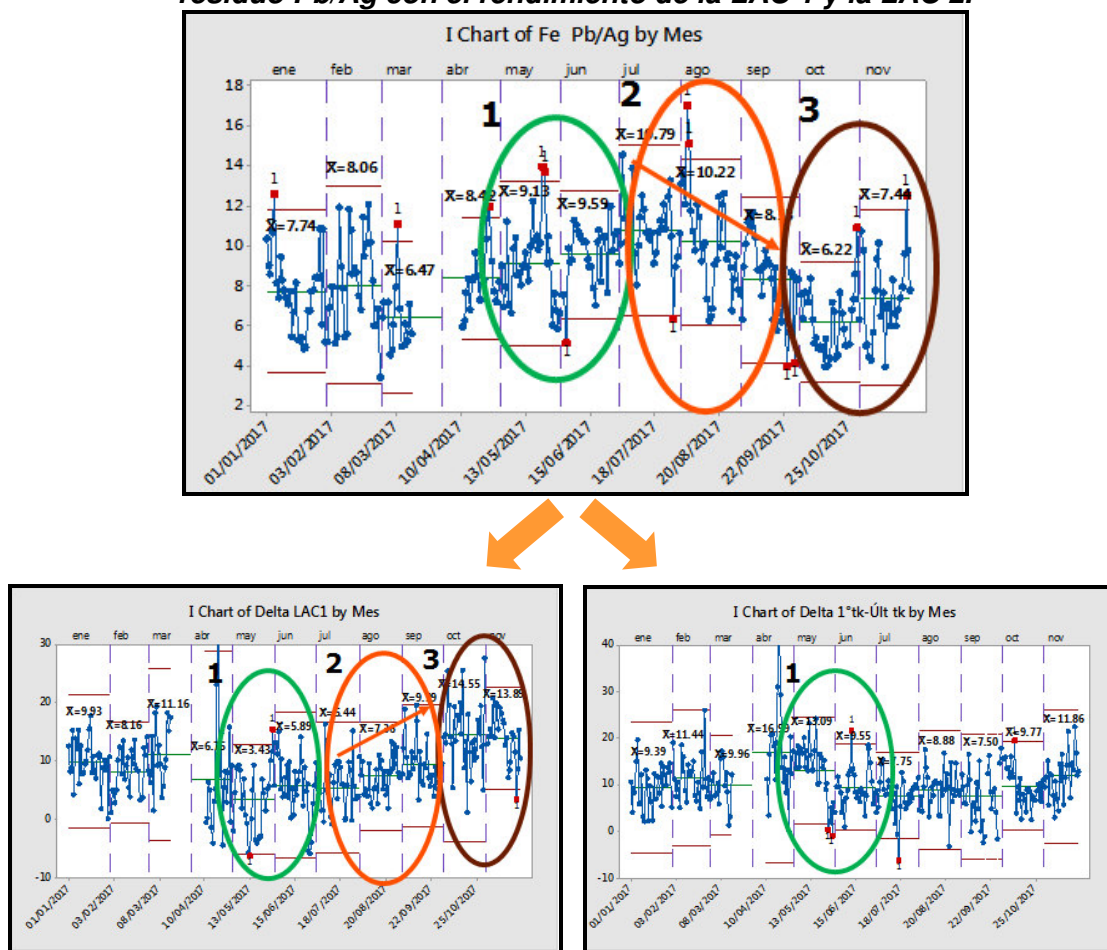
Gráfico N° 6: Correlación del ZnIW con el %Fe y %S



Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

Partiendo del análisis del %Fe presente en el residuo Pb/Ag, se realizó un análisis del rendimiento de cada una de las etapas de lixiviación (LAC 1 y LAC 2), el cual se muestra en el gráfico N° 7.

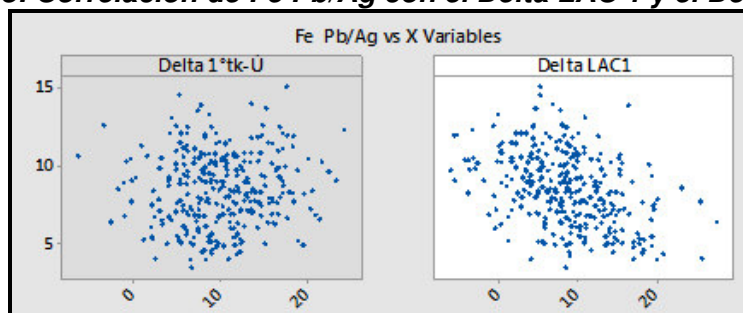
Gráfico N° 7: Comparación gráfica del comportamiento de las ferritas de zinc del residuo Pb/Ag con el rendimiento de la LAC 1 y la LAC 2.



Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

En este gráfico se muestra el rendimiento de cada etapa de lixiviación (LAC 1 y LAC 2) relacionado con el porcentaje de ferritas de zinc presentes en el residuo Pb/Ag, el cual está representado por el diferencial de acidez que muestra desde que ingresa hasta que sale de cada etapa (delta LAC 1 y delta LAC 2), donde a medida que incrementa el diferencial de acidez refleja una mejor lixiviación de las ferritas.

Claramente se observa en el período N° 2 la correlación que guarda el rendimiento de la LAC 1 con la presencia de ferritas de zinc en el residuo Pb/Ag, a medida que incrementa el diferencial de acidez en esta etapa, disminuye la presencia del Fe en el ZnIW; y del mismo modo en el período N° 3, donde se observa nuevamente que al incrementar el diferencial de acidez en la LAC 1 se concluye en una disminución del porcentaje de Fe en el ZnIW, y es por ello que se halló el porcentaje de participación (correlación) de estas variables con la presencia de Fe en el ZnIW y se muestra en el gráfico N° 8, donde el 17% de impacto se identifica en la LAC 1.

Gráfico N° 8: Correlación de Fe Pb/Ag con el Delta LAC 1 y el Delta de LAC 2

Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

Por lo tanto, con la correlación de variables halladas en la 3ra etapa de análisis y la comparación de datos del rendimiento de la LAC 1 con el %Fe en el residuo Pb/Ag se plantearon acciones para trabajar en reducir el porcentaje del ZnIW como lo muestra el cuadro N° 6.

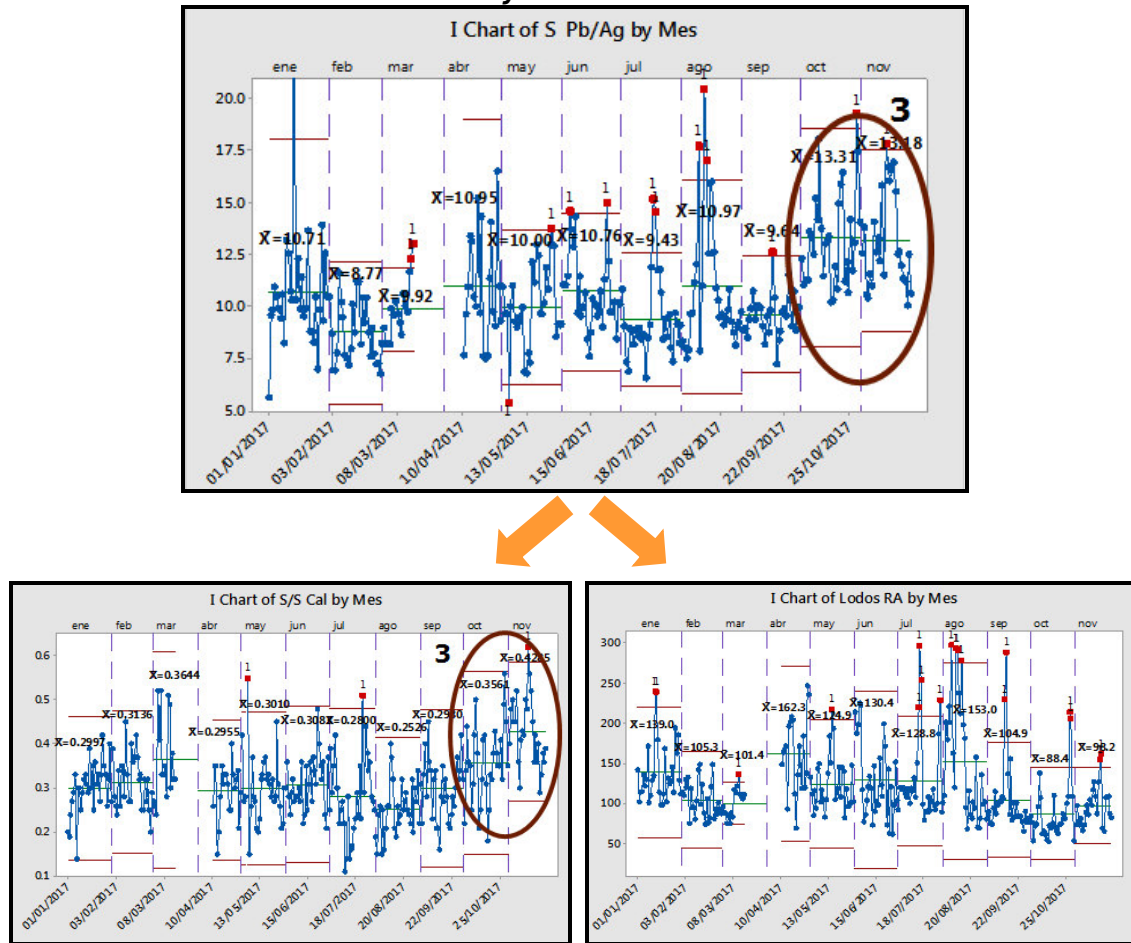
Cuadro N° 6: Plan de acción para el controlar Acidez y Temperatura en LAC 1

Causa	X's	Acciones	Impacto	Esfuerzo	Responsable	Inicio	Final	Status
Control de Temperatura LAC 1	X08-	Aumentar la temperatura de LAC 1 y controlar temperatura mínima en último tanque: 95°C	Alto	Bajo	Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%
Control de Temperatura LAC 2	X13-	Aumentar la temperatura de LAC2 y controlar temperaturas mínimas de 98 °C para los Tanques: D1021, D1020, D2040	Alto	Bajo	Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%
Acidez OF LAC1	X16-	Mantener la acidez de OF de LAC1 en mínimo 60 g/L. Monitorear acidez en OF de LAC1: 62g/L, en tanque D049: 76g/L	Alto	Alto	Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%
Acidez OF LAC2	X09-	Controlar acidez mínima en OF de LAC2: 125g/L	Alto	Alto	Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%
Acidez Spent	X12-	Mantener la acidez de SPENT de LAC2 en mínimo 190 g/L	Alto	Alto	Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%
Flujo de Spent / Flujo CC	X14-	Mantener el Flujo de Spent x Flujo en Canal Caliente entre 0.46 y 0.51 m3/h	Alto	Bajo	Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%
Zn en CC		Operar Zn en canal neutro entre 160 g/L +/-5g/L			Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%
Eficiencia LAC1 Delta Acidez	Y4-	Monitorear delta de acidez de la etapa en 14g/L			Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%
Eficiencia LAC2 Delta Acidez	Y5-	Monitorear delta de acidez de la etapa en 11g/L			Edgar Carrero	15/12/2017	15/02/2018	● 100%

Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Metodología Six Sigma. Nexa Resources Cajamarquilla.

Siguiendo con la comparación de datos en el gráfico N° 5, para el período N° 3 referente al comportamiento del porcentaje de azufre (%S) presente en el ZnIW, se tiene el análisis de tendencias con datos históricos que afectan a esta variable, el cual se muestra en el gráfico N° 9.

Gráfico N° 9: Comparación gráfica del comportamiento del %S presente en el ZnIW con el %S/S en la calcina y el S de los lodos de la Reducción Ácida.

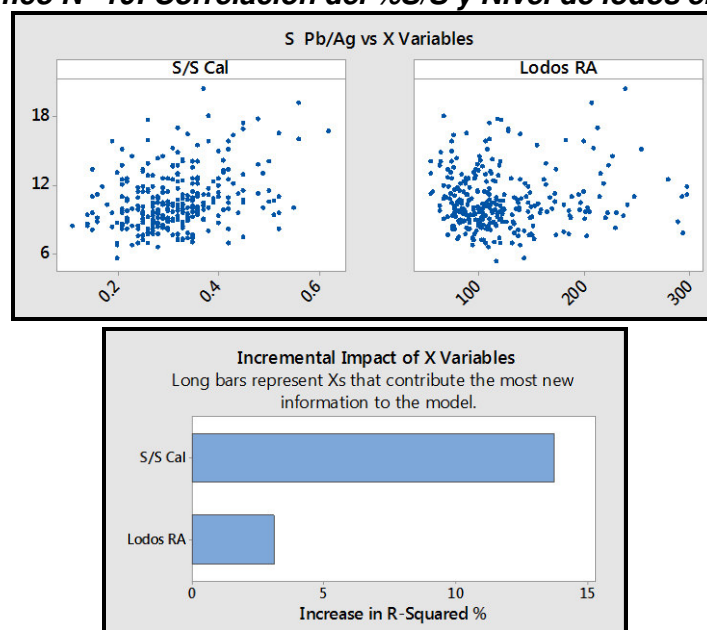


Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

Este gráfico muestra el incremento del %S en el residuo Pb/Ag, el cual es impactado la presencia de azufre en forma de sulfuros proveniente de la calcina de zinc de la planta de tostación de concentrados (%S/S), a medida que incrementa el %S/S en la calcina incrementa el %S en el residuo Pb/Ag; a la vez se compara con el %S presente en la etapa de reducción ácida, el cual no refleja un incremento de nivel de lodos que pueda impactar por medio de un rebose.

Por lo tanto, según el análisis gráfico se realizó correlaciones con lo nombrado en la figura anterior, el cual se halla el porcentaje de participación del %S/S de la calcina en el gráfico N° 10.

Gráfico N° 10: Correlación del %S/S y Nivel de lodos en RA.



Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

Para este análisis realizado se plantearon acciones para trabajar en reducir el %S/S en la calcina proveniente de la planta de tostación de concentrados, el cual se muestra en cuadro N° 7.

Cuadro N° 7: Plan de acción para controlar el %S/S en la calcina

Causa	X's	Acciones	Impacto	Esfuerzo	Responsable	Inicio	Final	Status
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Bajar Ritmo de 41 a 39.5 tms/h manteniendo 8.68 tms/día/m2. (impacto por humedad de concentrados)	Alto	Alto	Oscar Choque	27/12/2017	27/12/2017	● 100%
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Sección 20: Bajar Inyección de agua al lecho de Horno en el inyector 3, para incrementar flujo de aire principal.	Alto	Alto	Oscar Choque	27/12/2017	27/12/2017	● 100%
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Sección 20: Incremento de Oxígeno a de 1800 a 1950 Nm3/h en función del consumo total de la planta (5000 Nm3/h)	Alto	Alto	Oscar Choque	27/12/2017	28/02/2018	● 100%
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Sección 20: Plan de reparación de paredes de PES Calientes en PPG – 1ra Etapa	Alto	Alto	Edwin Rios	27/12/2017	28/02/2018	● 50%
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Sección 20: Plan de reparación de paredes de PES Calientes en PPG – 2da Etapa	Alto	Alto	Edwin Rios	27/12/2017	30/07/2019	● 0%
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Sección 25: Bajar Ritmo de 49 a 48.5 tms/h manteniendo 8.41 tms/día/m2. (impacto por humedad de concentrados)	Alto	Alto	Oscar Choque	27/12/2017	27/12/2017	● 100%
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Sección 25: Implementar nuevo modelo de inyector de agua por quemador N°4 para reducir volumen de agua, bajar las temperaturas del tostador e incrementar aire secundario.	Alto	Alto	Oscar Choque	27/12/2017	27/12/2017	● 100%
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Sección 25: Plan de reparación de paredes de PES Calientes en PPG – 1ra Etapa	Alto	Alto	Edwin Rios	27/12/2017	30/12/2018	● 40%
Calidad de Calcina - % S/S	X09-	Sección 25: Plan de reparación de paredes de PES Calientes en PPG – 2da Etapa	Alto	Alto	Edwin Rios	27/12/2017	31/12/2019	● 0%

Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Metodología Six Sigma. Nexa Resources Cajamarquilla.

4.1.5. 5ta Etapa – Controlar

En la etapa se establecen controles estadísticos que permitan garantizar la mejora a largo plazo, comprobar el sistema de medida, las causas de variación, medir el beneficio comparando el antes y después de la mejora, se deben también incluir planes de control, que aseguren a estas mejoras mantenerse en el tiempo límite especificado.

- La capacitación del método propuesto.
- La documentación correspondiente para toda persona que desee hacer el proceso, sin conocimiento previo (con su actualización correspondiente).
- Un plan de respuesta en caso de una falla del proceso.

En esta etapa se plantearon las siguientes acciones para buscar la estandarización de los cambios como lo muestra el cuadro N° 8.

Cuadro N° 8: Plan de acción de estandarización de los cambios.

Acción	Motivo	Lugar	Responsable	Fecha Inicio	Fecha Término	Status	Costo
Análisis Mineralógico de compuestos de Fe y S en el Residuo Pb/Ag	Identificar las especies mineralógicas que puedan afectar la lixiviación de ferritas de zinc en las etapas previas a la filtración del residuo Pb/Ag	SGS - Canadá	Oscar Cardoza	04/12/2017	19/01/2018	● 100%	\$1,532.00
Elaboración de un Panel de Control en PI	Contribuir en el control operacional para la Supervisión de las variables planteadas.	Cajamarquilla	Merly Lopez	14/12/2017	15/12/2017	● 100%	\$0.00
Difusión de acciones a Jefes de Guardia	Informar a cada Jefe de Guardia sobre la creación de un nuevo Panel de Control en PI que asista al seguimiento de las variables identificadas que impactan el Rendimiento de la Lixiviación Ácida	Cajamarquilla / Hidrometalurgia	Priscilla Salinas	14/12/2017	14/12/2017	● 100%	\$0.00
Realizar seguimiento de GRD en Lixiviación	Identificar oportunidades de mejora y reconocer las buenas prácticas para optimizar el detalle del control operacional, con el objetivo de incrementar el rendimiento de la Lixiviación ácida y alcanzar la reducción del ZnIW en el residuo Pb/Ag.	Cajamarquilla / Lixiviación	Oscar Cardoza / Priscilla Salinas	21/12/2017	05/01/2018	● 100%	\$0.00

Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Metodología Six Sigma. Nexa Resources Cajamarquilla.

Como se puede observar en el cuadro anterior, se plantearon acciones para identificar la estructura mineralógica de la muestra de ZnIW en el residuo Pb/Ag, el cómo se presenta el Hierro y el Azufre, y como qué compuesto está formado, esto para evidenciar la presencia de contaminantes en el proceso.

Por otro lado, se plantearon acciones secundarias como la elaboración de un panel de control para la supervisión del área, donde se controla minuto a minuto las variables analizadas.

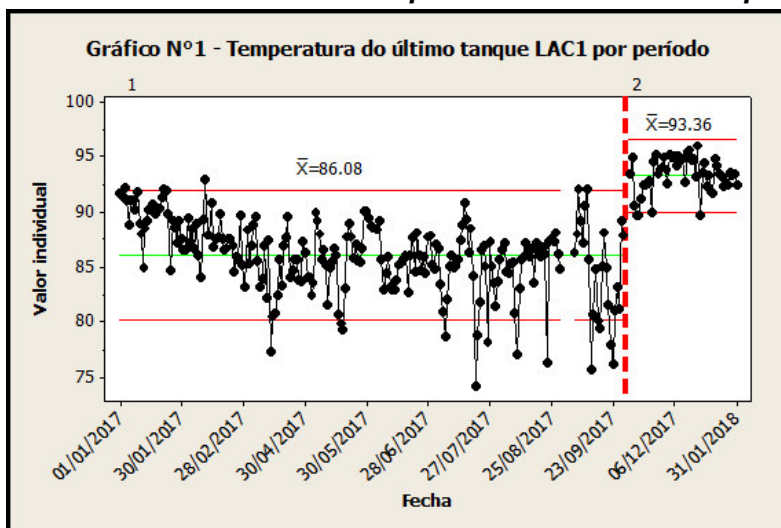
Para buscar la estandarización de los cambios, se realizó la difusión de las acciones a los Jefes de Guardia, Supervisores y Operadores, para lograr los

resultados proyectados, y con ello se normó en un padrón de procesos el cambio realizado y se incluyó en la gestión de rutina diaria (GRD).

4.1.5.1. Gráficas de Control

En las siguientes gráficas de control observaremos cómo se logra incrementar los valores de las variables analizadas y a la vez la comparación con el comportamiento del ZnIW en el residuo Pb/Ag.

Gráfico N° 11: Gráfica de control de Temperatura del último Tanque de la LAC 1

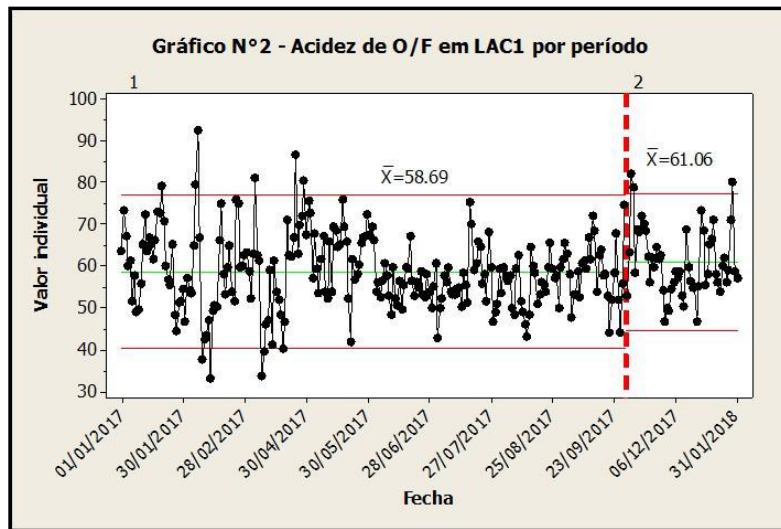


Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

Claramente se observa que en el 2do período (período donde se inician los cambios según el plan de acción) que la temperatura del último tanque de la LAC 1 se incrementa de 86°C a 93°C, este efecto logra generar una mejora en el comportamiento de la lixiviación, a pesar de que no se ha logrado alcanzar los 95°C que se planteó.

A la vez observamos en el gráfico N° 12 la gráfica de control de acidez en el over flow del espesador de la LAC 1.

Gráfico N° 12: Gráfica de control de la Acidez del O/F del espesador de la LAC 1

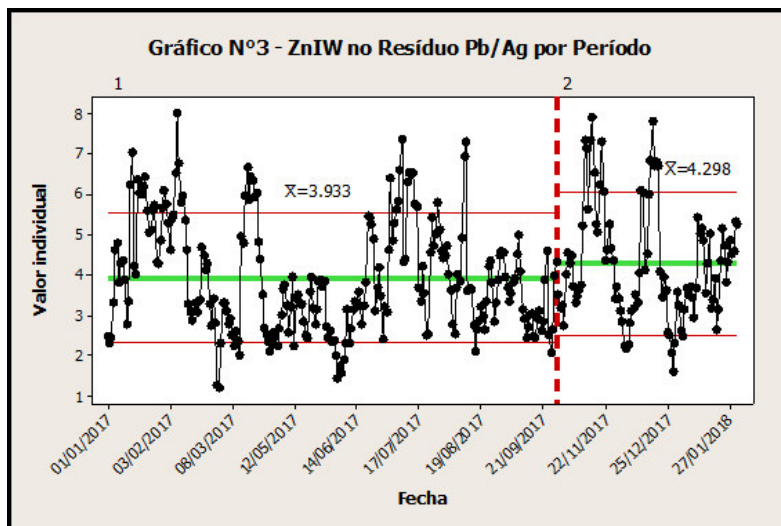


Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

En este gráfico podemos observar el incremento de la acidez en el over flow del espesador que asciende de 58 g/L a 61 g/L, esta variable si logró alcanzar los 60 g/L que se planteó como valor mínimo para obtener resultados positivos.

Sin embargo, en el gráfico N° 13 donde mostramos el comportamiento del ZnIW en el residuo Pb/Ag, comparando los mismos períodos, se aprecia que hay un incremento del mismo a pesar de haber trabajado en las dos variables analizadas.

Gráfico N° 13: Gráfica de control del ZnIW en el residuo Pb/Ag

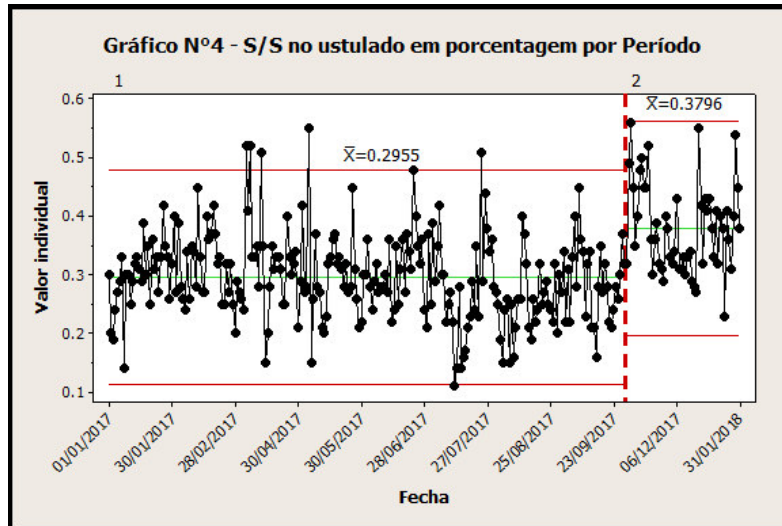


Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

Este incremento del ZnIW en el residuo Pb/Ag se debe al incremento del porcentaje de azufre como sulfuro (%S/S⁼) en la calcina de zinc proveniente de la planta de tostación de concentrados, a causa de

problemas que se presentaron en dicha planta en la oxidación del concentrado, y se muestra en el gráfico N° 14.

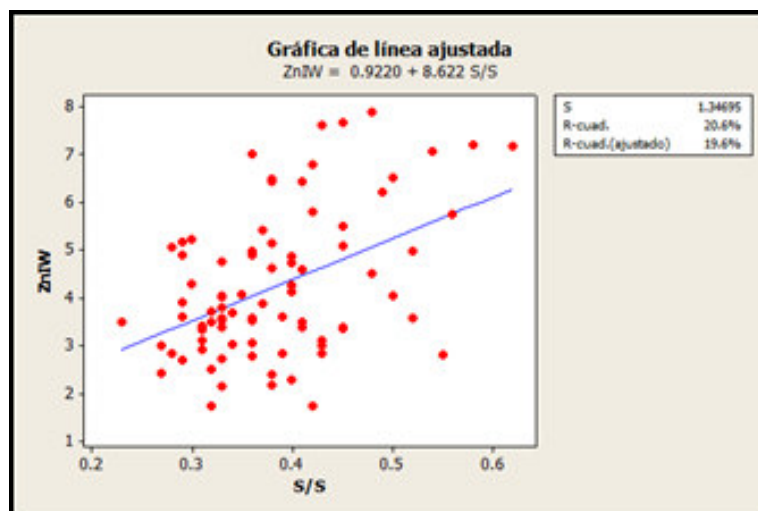
Gráfico N° 14: Gráfica de control del %S/S⁼ en la calcina de zinc



Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

En este gráfico se muestra el comportamiento del %S/S⁼ de la calcina de zinc alimentada al proceso de lixiviación, lo que impacta claramente en el resultado de ZnIW del residuo Pb/Ag. Con esta información se elaboró una nueva correlación para verificar el porcentaje de impacto que tiene esta variable en este 2do período, y se muestra en el gráfico N° 15.

Gráfico N° 15: Gráfica de correlación del %S/S⁼ con el ZnIW en el residuo Pb/Ag

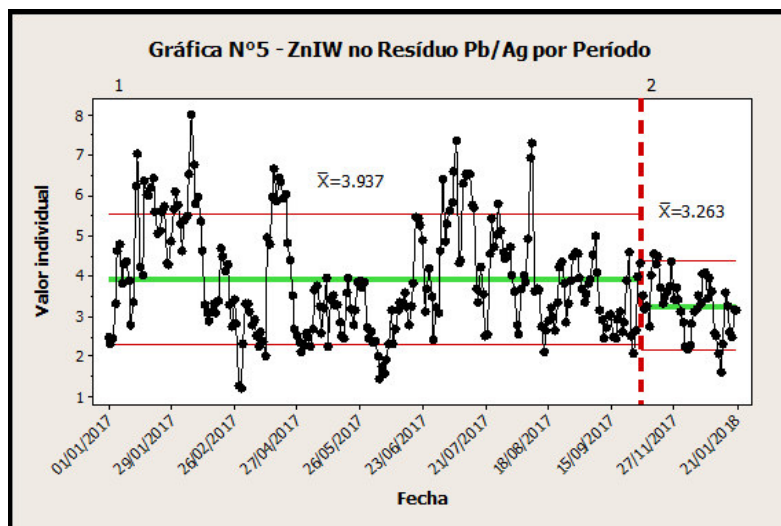


Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

En este gráfico se logra demostrar que el %S/S⁼ en la calcina de zinc tiene un 20% de actuación en la variabilidad del %ZnIW en el residuo Pb/Ag, esto demuestra que las acciones planteadas se deben alcanzar para que se logre nuestro objetivo.

Luego de haber realizado el análisis adicional, se simula un nuevo resultado filtrando los días donde el %S/S en la calcina tuvo un valor mayor a 0.34%, dando el siguiente resultado mostrado en el gráfico N° 16.

Gráfico N° 16: Gráfica de control del ZnIW con filtro en el %S/S



Fuente: Proyecto Desafío Programa Potenciar – Minitab. Nexa Resources Cajamarquilla.

El gráfico muestra el comportamiento del porcentaje de zinc insoluble en el residuo plomo plata (%ZnIW residuo Pb/Ag) impactado por la reducción del porcentaje de azufre como sulfuros en la calcina de zinc (%S/S en la calcina), esto reflejado en el período N° 2 de la gráfica, como se nombra en líneas previas, se filtraron los días que sobrepasaba el valor de 0.34% de S/S de la calcina, el cual baja considerablemente a un 3.26% en promedio para ese período en el %ZnIW.

4.1.5.2. Investigación Mineralógica

Dado este resultado se envía una muestra de ZnIW del residuo Pb/Ag a los laboratorios de SGS Canadá para una investigación de mineralogía por microscopía de barrido, con el objetivo de saber qué especies mineralógicas se presentan en este compuesto para explicar el alto contenido de ZnIW, el cual impacta directamente en la recuperación de zinc del circuito.

Con ello se corroboró la estrategia (plan de acción) que permitirá reducir o eliminar esta fuente de pérdida y lograr el incremento de la recuperación de zinc.

En la investigación se usaron análisis por microscopía electrónica (SEM-EDS), Difracción de Rayos-X (XRD) y Geoquímicos para determinar la estructura mineralógica del Residuo Pb-Ag y del Concentrado de Ag.

Según los resultados de la investigación por XRD semi-cuantitativos (Cuadro N° 9), las muestras consisten de anhidrita, esfalerita, azufre y jarosita con cantidades menores (<7%) de argentojarosita, plumbojarosita, anglesita, hematita, feldespato, barita, celestina, hercinita, piritita, voltaita y zincita. Resalta la diferencia (%) de contenidos de esfalerita, anhidrita, azufre y jarosita entre las dos muestras.

La presencia de franklinita (ferrita de zinc) no fue detectada por XRD cuyo límite de detección es 1 a 2% dependiendo de su cristalinidad y cualquier especie amorfa no puede ser detectada.

Cuadro N° 9: Resultados de la Investigación Mineralógica

Crystalline Mineral Assemblage (relative proportions based on peak height)				
Sample	Major (>30% Wt)	Moderate (10% -30% Wt)	Minor (2% -10% Wt)	Trace (<2% Wt)
(1) Res.Pb/Ag(40_16)D_2088	anhydrite	-	anglesite, jarosite, plumbojarosite, sphalerite, hematite, voltaite, sulfur, orthoclase, hercynite, zincite, barite, celestine	-
(2) Conc.Ag Produccion T-165263	sphalerite	sulphur, anhydrite	jarosite, potassium-feldspar, argentojarosite, pyrite, hematite	*anglesite, *hercynite, *barite, *celestine

* tentative identification due to low concentrations, diffraction line overlap or poor crystallinity

Mineral	Mineral Formula	Res.Pb/Ag(40_16)D_2088	Conc.Ag Produccion T-165263
		(wt %)	(wt %)
Sphalerite	ZnS	9.9	37.6
Anhydrite	CaSO ₄	30.8	12.9
Sulfur	S	7.1	21.7
Jarosite	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	9.7	8.1
Argentojarosite	AgFe ³⁺ ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	-	3.9
Hematite	Fe ₂ O ₃	7.0	2.7
Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	5.2	4.4
Zincite	ZnO	6.2	-
Voltaite	K ₂ Fe ²⁺ ₅ Fe ³⁺ ₃ Al(SO ₄) ₁₂ ·18(H ₂ O)	6.1	-
Hercynite	FeAl ₂ O ₄	4.2	1.5
Anglesite	PbSO ₄	3.7	1.6
Celestine	SrSO ₄	3.9	1.1
Barite	BaSO ₄	3.2	1.7
Plumbojarosite	PbFe ³⁺ ₆ (SO ₄) ₄ (OH) ₁₂	2.9	-
Pyrite	FeS ₂	-	3.1
TOTAL		100	100

Fuente: Análisis de Microscopía de Barrido – SGS. Nexa Resources Cajamarquilla.

CAPITULO V

5.1. CONCLUSIONES

- La metodología seis sigma proporciona una herramienta de mejora continua eficaz, a través de estadística aplicada, que apoya la satisfacción del cliente y optimiza recursos evitando flujos económicos en gran magnitud.
- El control de la temperatura y la acidez en la etapa de lixiviación ácida caliente permitió contenidos de zinc insoluble de 3.9% en el residuo Pb/Ag, al retirar el impacto del incremento de azufre en forma de sulfuros en la calcina, el contenido de zinc baja a 3.2%, sin embargo aún sigue por encima nuestro objetivo del proyecto que es de 2.81%, el cual luego de cerrar las acciones planteadas para el área de tostación referente a la calidad de la calcina, se alcanzará el objetivo según lo planeado.
- Según la investigación mineralógica SEM-EDS (Scanning Electron Microscope equipado con un Energy Dispersive Spectrometer), el zinc (6%) contenido en el residuo Pb/Ag se encuentra principalmente como ZnS (10%) y en menores cantidades como óxidos y sulfatos (6%), acompañados de CaSO_4 (31%), diferentes jarositas (19%), azufre elemental (7%), silicato (5%) y sulfatos insolubles (11%), con esto se corrobora la información analizada durante el proyecto, el cual re afirmamos que el azufre contenido en la calcina impacta en gran magnitud la lixiviación de ferritas de zinc.
- La reducción del azufre en forma de sulfuros en la calcina por debajo del 0.34% se logrará en función al cumplimiento del plan de acción que aún está vigente según las fechas de cierre que muestra el Cuadro N° 07, con ello el zinc insoluble en el residuo Pb/Ag alcanzará la meta de 2.81% lo que refleja una incremento en la recuperación global del 0.15%.
- La estandarización de los parámetros de control propuestos en este proyecto lograron mantener las variables constantes para la gestión de la rutina diaria de las operaciones.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere iniciar una investigación en la caracterización de la mezcla de concentrados alimentados a la tostación de zinc y que impacto tienen estos en la calidad de la calcina (% de azufre).
- Se debe culminar el plan de acción planteado para disminuir el porcentaje de azufre como sulfuro presente en la calcina, el cual debe de ser menor a 0.34% para garantizar una óptima lixiviación de ferritas de zinc en la etapa de lixiviación ácida.
- Aplicar la estandarización de los límites inferiores y superiores de las variables para evidenciar que el resultado se mantiene en el tiempo.

CAPITULO VI

3.1. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acuosa: Se habla de una disolución acuosa (aq o ac) siempre que el disolvente (o el disolvente mayoritario, en el caso de una mezcla de disolventes) es agua. El agua como disolvente es muy polar y forma puentes de hidrógeno muy fuertes.

Bomba neumática: Es un tipo de bomba de desplazamiento positivo alternativo, en la que el aumento de presión se realiza por el empuje de unas membranas elásticas (o diafragmas) que permiten crear un volumen variable en la cámara de bombeo, aumentándola en la fase de aspiración y reduciéndola en la fase de expulsión del fluido.

Calcina (ZnO): óxido de zinc producido por un tostador a partir de concentrados sulfurados de zinc (esfalerita).

Caldera: Máquina o equipo de ingeniería diseñado para producir vapor a través de la transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido (agua ultra pura), originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase a vapor saturado.

Catalizador: Es un compuesto químico que acelera o favorece la reacción sin intervenir directamente en ella.

Ciclones: Es un equipo de ingeniería diseñado para separar partículas sólidas suspendidas en el gas, utilizando un vórtice para la separación.

DCS (Sistema de Control Distribuido): es un sistema de control aplicado a procesos industriales complejos en las grandes industrias como petroquímicas, papeleras, metalúrgicas, centrales de generación, plantas de tratamiento de aguas, incineradoras o la industria farmacéutica, trabajan con una sola base de datos integrada para todas las señales, variables, objetos gráficos, alarmas y eventos del sistema. En los DCS la herramienta de ingeniería para programar el sistema es sólo una y opera de forma centralizada para desarrollar la lógica de sus controladores o los objetos gráficos de la monitorización. Desde este puesto de ingeniería se cargan los programas de forma transparente a los equipos del sistema.

Espesador: Los espesadores son equipos de separación sólido-líquido en los que una suspensión de sólidos formando una pulpa, se alimenta a un tanque provisto de un mecanismo interno que mediante la acción de la gravedad permite concentrar los sólidos en el fondo y hace fluir el agua clarificada hacia la superficie para ser recogida en el rebose del tanque.

Fluidización: Inyección de aire en el tostador para la oxidación de los sulfuros de zinc (concentrados).

Geo-membranas (norma AFNOR NFP 84-500): son productos adaptados a la ingeniería civil, delgadas, continuas estancas a los líquidos. Actualmente no se consideran geomembranas los productos con un espesor funcional inferior al milímetro ni los que la estanqueidad está asegurada únicamente por la presencia de un material arcilloso. Están hechas de polietileno, de alta y de baja densidad (HDPE, VFPE), de elastómero bituminoso, de polipropileno (PP) o en cloruro de polivinilo (PVC). Son termo soldables para realizar las uniones en condiciones de calidad y fiabilidad óptimas.

Goethita: Es la forma mineral del oxihidróxido de hierro (III), cuya fórmula es $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$. Dentro de la clasificación de Strunz está encuadrado en el grupo 04 (óxidos e hidróxidos).

Intercambiador de calor: es un equipo diseñado para transferir calor entre dos fluidos, o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento, con la finalidad de aportar enfriamiento de una masa a otra.

Jarosita: Es un compuesto formado por sulfato de potasio y hierro hidratado básico, cuya fórmula química es $\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$

LAC 1: Lixiviación ácida 1 o también llamado lixiviación ácida caliente.

LAC 2: Lixiviación ácida 2 o también llamado lixiviación súper ácida caliente.

Overflow (O/F): Producto de rebose de solución clarificada un espesador de separación sólido – líquido, proveniente de un proceso hidrometalúrgico.

Precipitadores: Los precipitadores o descontaminadores electrostáticos (o ESP por sus siglas en inglés) son dispositivos que se utilizan para atrapar partículas mediante su ionización, atrayéndolas por una carga electrostática inducida.

Reactor: Un reactor químico es un equipo en cuyo interior tiene lugar una reacción química, diseñado para maximizar la conversión y la selectividad de esa reacción con el menor coste posible.

Serpentín de enfriamiento: Sistema de tuberías resistentes a elevadas temperaturas por donde circula agua en su interior a alta presión y temperatura para aportar intercambio de calor con el material en contacto (calcina).

Spent: Significado en Inglés del electrolito agotado proveniente de la etapa metalúrgica de la electrólisis.

Torre de absorción: utilizadas para el contacto continuo del líquido y del gas tanto en el flujo a contracorriente como a corriente paralela, son columnas verticales que se han llenado con empaque o con dispositivos de superficie grande. El líquido se distribuye sobre estos y escurre hacia abajo, a través del lecho empacado, de tal forma que expone una gran superficie al contacto con el gas.

Torre empacada: Refiere a una torre con recubrimiento interno de plomo cargada con un material cerámico en su interior que permite la captación de sólidos (calcina) provenientes del gas (SO_2) que succiona el sistema de sopladores desde el tostador, con la finalidad de enfriar y lavar el gas.

Tostador de lecho fluidizado: Reactor para tratamiento de sulfuros de zinc con una parrilla que contiene toberas para la inyección de aire para mantener una cama suspendida y uniforme a temperatura elevada (930°C) por efecto de una reacción exotérmica que es causada por la reacción química del azufre con el oxígeno del aire a una temperatura de transición de 750°C .

Underflow (U/F): Producto de descarga de un espesador de separación sólido – líquido, proveniente de un proceso hidrometalúrgico.

Zinc refinado en lingotes de SHG (Special High Grade): Zinc refinado en lingotes de alto grado especial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arq. Edgar Giovanni Treviño Orozco

Enero 2004

“Proyecto Six Sigma”

Universidad Autónoma de Nuevo León – Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Tesis para obtener el grado de Maestría en “Ciencias de la Ingeniería de Manufactura”
con especialidad en diseño del Producto

Jose Luis Maccasi Meza

Junio 2016

“Manual de Proceso de Producción de Zinc”

Nexa Resources Cajamarquilla - Planta de Hidrometalurgia Proyecto 320K
Manual elaborado para entrenamiento específico del personal.

Jose Maccasi Meza

Noviembre 2017

“Microscopía Electrónica con Microscopio de Barrido – Muestra de Zinc Insoluble del residuo Pb/Ag”

Nexa Resources – Refinería de Cajamarquilla 2017
Estudio Realizado en Laboratorios de SGS Canadá

Dandy Calla Choque

Mayo 2012

“Tratamiento de los residuos del proceso Jarosita de la industria metalúrgica del zinc, con la finalidad de mitigar este pasivo ambiental”

Universidad Nacional de Ingeniería
Tesis para optar el grado de Maestría en “Ciencias con mención en Minería y Medio Ambiente”

Emerson Delgado López

Octubre 2015

“Propuesta de un plan para la reducción de la merma utilizando la metodología Six sigma en una planta de productos plásticos”

Pontificia Universidad Católica del Perú – Escuela de Post Grado
Tesis para optar el grado de Magíster en “Ingeniería Industrial con mención en Gestión de Operaciones”

M. V. Málaga y K. A. Metcalfe

Junio 1998

“Sixteen years of operation at the Cajamarquilla Zinc Refinery”

Zinc and Lead Processing
The Metallurgical Society of CIM, 1998

Adriana Zapata Rosso

Enero 2018

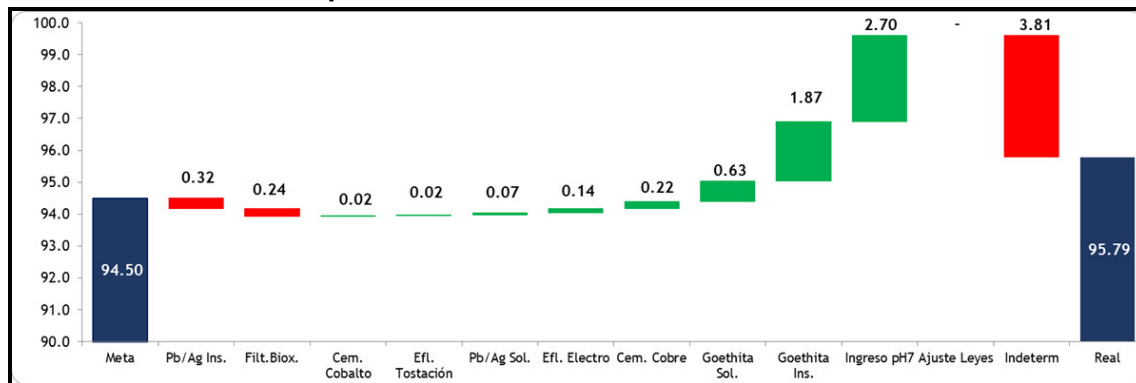
“El Indio en Bolivia: Muchos cerros a la izquierda”

Reporte de Industrias Extractivas 4 – CELDA

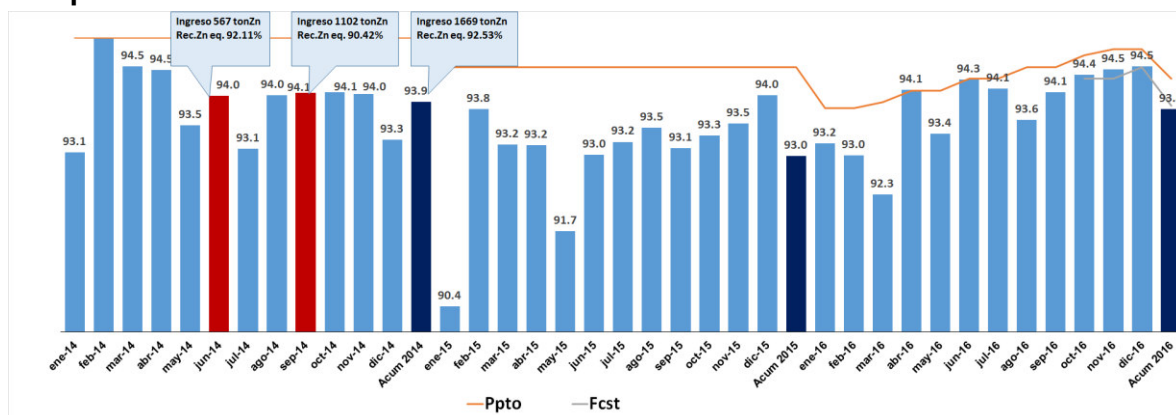
Centro de Estudios para el Desarrollo Laboral y Agrario

ANEXOS

Representación gráfica de los indicadores clave de proceso (KPI) que afectan directamente a la Recuperación de Zinc



Representación Gráfica de los datos históricos del comportamiento de la recuperación de zinc



Balance Metalúrgico

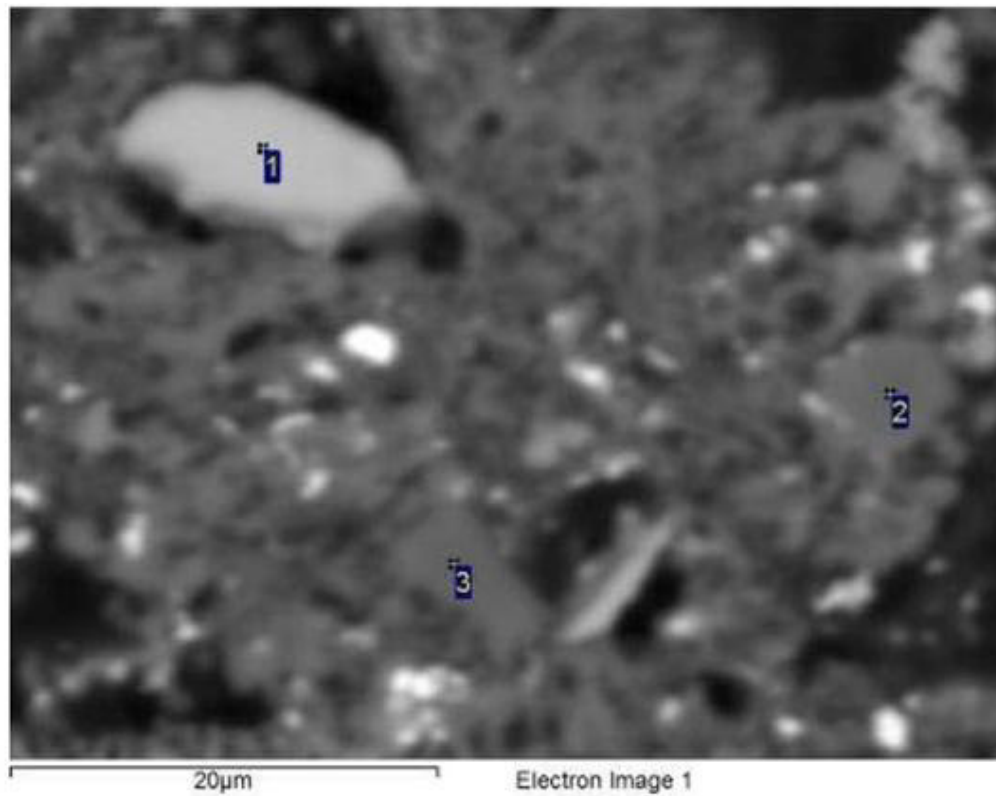
Balance Metalúrgico Mensual												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Stock inicial	11,043.4	8,014.6	7,907.7	9,602.2	8,617.0	9,407.4	9,216.5	10,520.5	6,881.9	11,267.0	9,328.5	9,618.8
Recepción	30,369.3	29,033.7	29,438.4	29,073.2	28,921.0	29,776.0	33,704.8	25,701.4	30,102.3	28,731.2	29,049.6	28,443.5
Ajuste por Leyes	0.0	0.0	-132.3	0.0	0.0	-253.9	-195.8	0.0	-169.7	0.0	190.4	-56.8
Consumo	33,398.1	29,140.6	27,611.5	30,058.4	28,130.6	29,713.0	32,205.1	29,339.9	25,547.5	30,669.7	28,949.6	32,685.1
Stock final	8,014.6	7,907.7	9,602.2	8,617.0	9,407.4	9,216.5	10,520.5	6,881.9	11,267.0	9,328.5	9,618.8	5,320.4
Δ Macro Stocks	-2,329.0	408.1	4,996.2	-643.0	3,280.4	569.4	-510.5	3,445.2	6,020.0	1,973.0	2,836.3	-213.7
Producción Refinada	27,842.9	25,774.1	28,440.6	27,243.2	28,082.2	26,809.9	28,498.3	28,506.2	27,906.3	28,687.8	27,821.6	28,603.2
Venta CPT	1,114.3	1,707.4	1,668.9	440.0	1,247.0	1,743.1	1,336.9	2,181.1	1,788.3	2,116.8	2,204.6	2,085.4
Producción Zn	28,957.2	27,481.4	30,109.6	27,683.2	29,329.2	28,553.0	29,835.2	30,687.3	29,694.6	30,804.6	30,026.1	30,688.6
Recuperación BM	93.20%	93.00%	92.34%	94.11%	93.37%	94.29%	94.13%	93.60%	94.07%	94.37%	94.46%	94.51%

Balance Metalúrgico Mensual Acumulado												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Stock inicial	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4	11,043.4
Recepción	30,369.3	59,403.0	88,841.4	117,914.6	146,835.6	176,611.6	210,316.4	236,017.8	266,120.0	294,851.2	323,900.8	352,344.3
Ajuste por Leyes	0.0	0.0	-132.3	-132.3	-132.3	-386.2	-582.0	-582.0	-751.7	-751.7	-561.2	-618.1
Consumo	33,398.1	62,538.7	90,150.2	120,208.6	148,339.2	178,052.2	210,257.3	239,597.3	265,144.7	295,814.5	324,764.1	357,449.2
Stock final	8,014.6	7,907.7	9,602.2	8,617.0	9,407.4	9,216.5	10,520.5	6,881.9	11,267.0	9,328.5	9,618.8	5,320.4
Δ Macro Stocks	-2,329.0	-1,920.9	3,075.3	2,432.3	5,712.7	6,282.1	5,771.6	9,216.8	15,236.8	17,209.7	20,046.1	19,832.4
Producción Refinada	27,842.9	53,617.0	82,057.6	109,300.8	137,383.0	164,192.9	192,691.2	221,197.4	249,103.7	277,791.5	305,613.1	334,216.3
Venta CPT	1,114.3	2,821.7	4,490.6	4,930.5	6,177.6	7,920.7	9,257.6	11,438.7	13,226.9	15,343.8	17,548.3	19,633.7
Producción Zn	28,957.24	56,438.65	86,548.21	114,231.39	143,560.57	172,113.60	201,948.80	232,636.05	262,330.61	293,135.26	323,161.37	353,849.98
Recuperación BM Acum	93.20%	93.11%	92.84%	93.14%	93.19%	93.37%	93.48%	93.50%	93.56%	93.65%	93.72%	93.79%

Imágenes de BSE y datos semicuantitativos - Res. Pb / Ag (40_16) D_2088.

- Imagen N° 1

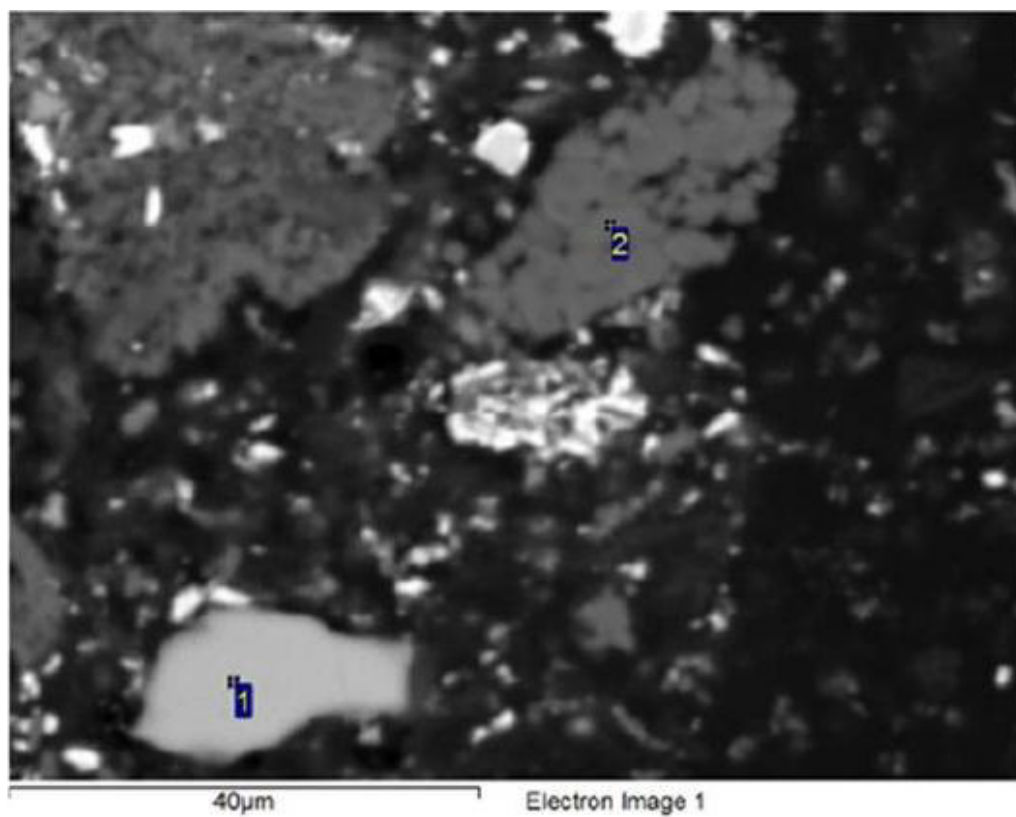
La imagen muestra la esfalerita y una partícula compuesta dominada por anhidrita; los granos blancos son Pb-sulfatos



Spectrum	O	Na	Si	S	Ca	Fe	Zn	Ba	Total	Mineral
1				37.2		1.0	61.9		100	Sphalerite
2	51.3		0.7	23.1	23.2	0.3	0.6	0.9	100	Anhydrite
3	53.7	0.6		22.2	23.5				100	Anhydrite

- **Imagen N° 2**

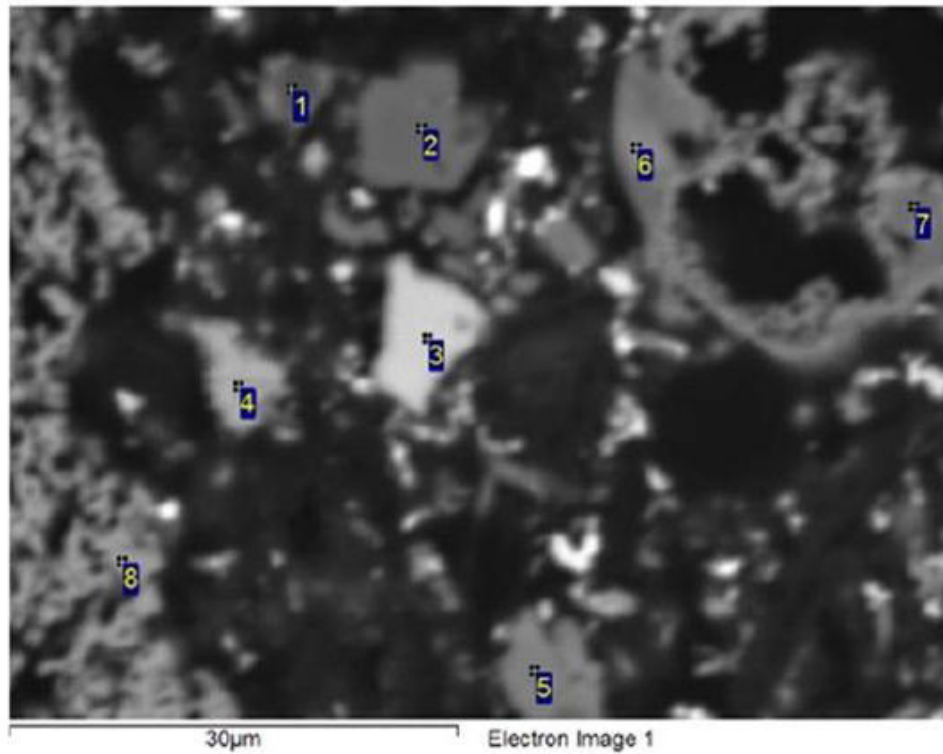
La imagen muestra esfalerita y un compuesto de anhidrita.



Spectrum	O	S	Ca	Fe	Cu	Zn	Total	Mineral
1		36.8		3	0.85	59.4	100	Sphalerite
2	54.8	22.3	22.9				100	Anhydrite

- **Imagen Nº 3**

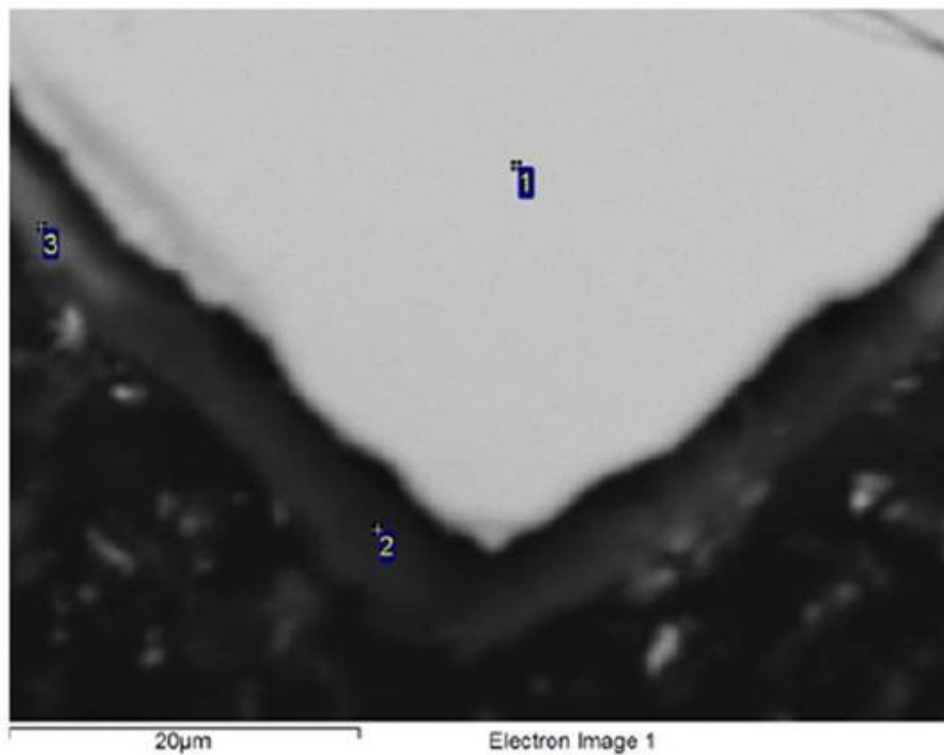
La imagen muestra partículas de grano fino y esqueléticas de escoria de Si, anhidrita que contiene Pb y Zn, esfalerita, celestina y óxidos de Fe u oxihidróxidos.



Spectrum	O	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Zn	Sr	Cd	Ba	Pb	Total	Mineral
1	59.0		37.3	1.7	0.2	0.6		0.4	0.9					100	Si-slag
2	50.7			23.7		25.0			0.6					100	Anhydrite
3				35.5				1.1	63.4					100	Sphalerite
4	39.9			19.0		1.1		0.9		37.2		1.8		100	Celestine
5	48.6		0.6	21.2		20.8					1.3		7.5	100	Pb-anhydrite
6	49.6			21.5		21.7		0.3			0.7		6.3	100	Pb-anhydrite
7	51.9	2.7		17.6		17.4	0.3	4.1	6.0					100	Zn-anhydrite
8	35.2			0.5				64.3						100	Fe-Ox

- **Imagen N° 4**

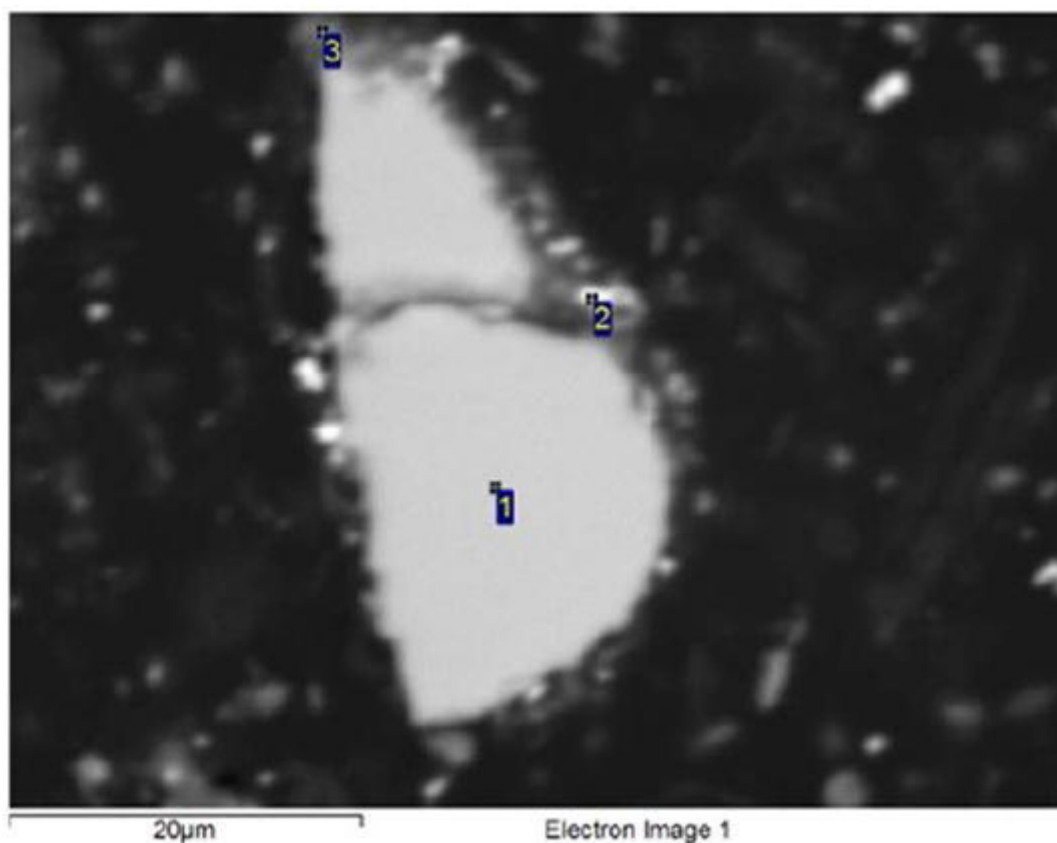
La imagen muestra la esfalerita bordeada por una escoria Si-S y una escoria Si-S-Fe-Zn.



Spectrum	O	Mg	Al	Si	S	K	Mn	Fe	Zn	Total	Mineral
1					36.0			0.9	63.1	100	Sphalerite
2	51.2		0.7	36.7	8.5			1.4	1.4	100	Si-S-slag
3	52.6	1.7	1.0	12.6	15.9	2.6	1.3	6.3	5.9	100	Si-S-Fe-Zn-slag

- **Imagen Nº 5**

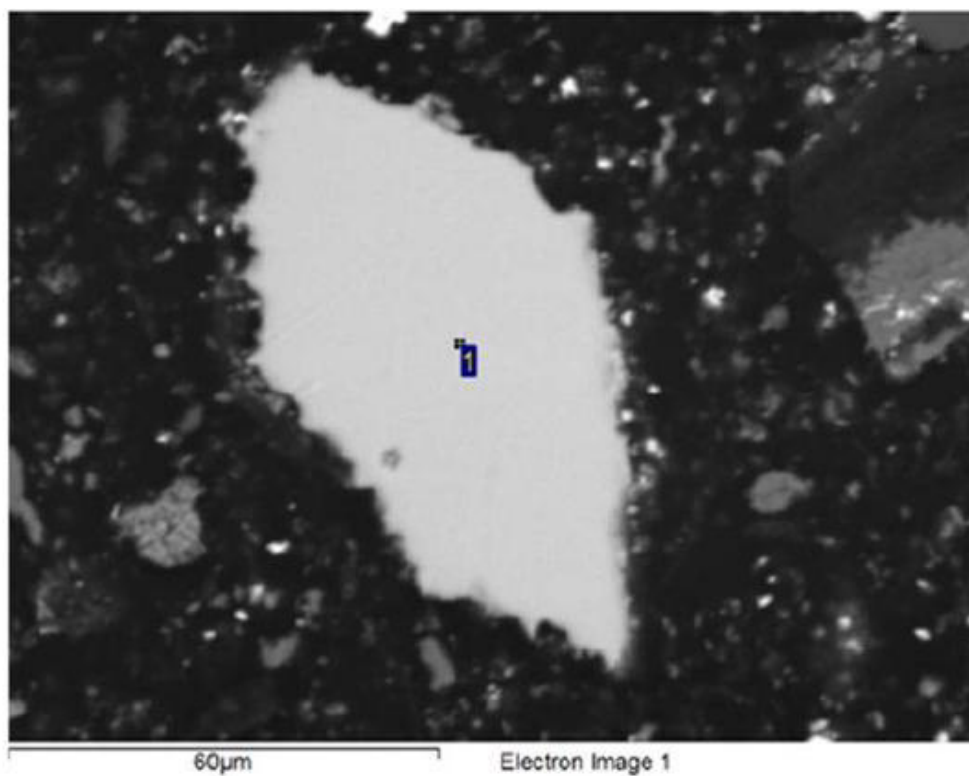
La imagen muestra esfalerita bordeada por celestina y Pb-sulfatos que transportan Zn; en este caso, Zn podría deberse a la interferencia de la esfalerita.



Spectrum	O	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Zn	Sr	Ag	Cd	Ba	W	Pb	Total	Mineral
1				35.8		0.6	0.6	61.7			1.2				100	Sphalerite
2	30.8	0.3	1.1	15.9	1.7	0.7		7.9				3.3	3.1	35.2	100	Pb-Zn-SO
3	41.2	1.0		22.9	1.0			7.9	21.4	2.5		2.2			100	Celestine

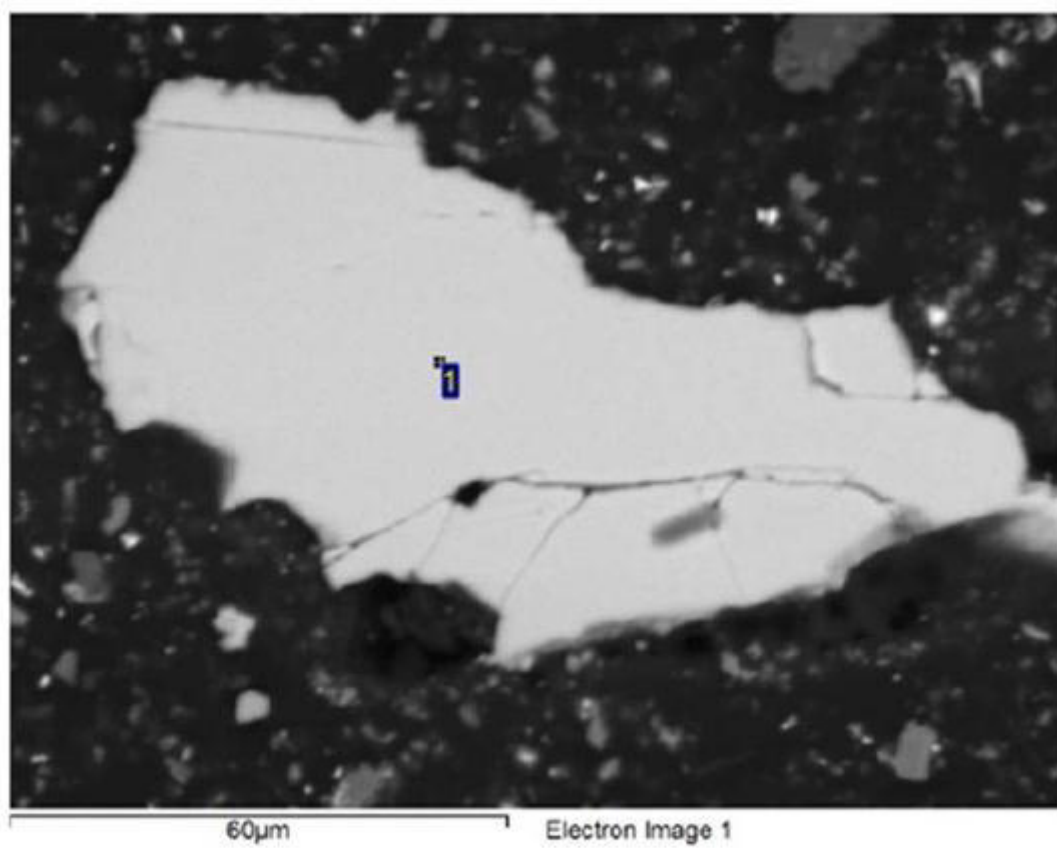
- **Imagen N° 6**

La imagen muestra una esfalerita con contornos robustos.



Spectrum	S	Fe	Zn	Cd	Total	Mineral
1	35.5	0.8	62.6	1.1	100	Sphalerite

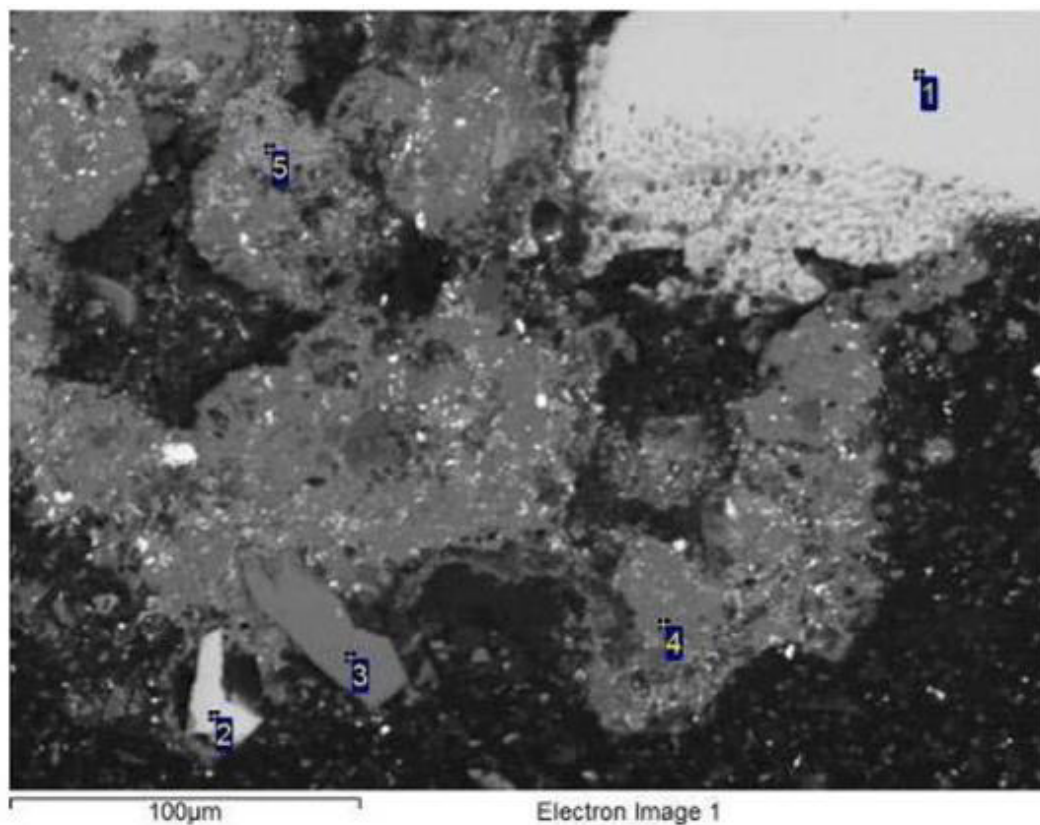
- **Imagen N° 8**
La imagen muestra esfalerita.



Spectrum	S	Fe	Zn	Total	Mineral
1	36.2	3.7	60.1	100	Sphalerite

- **Imagen Nº 9**

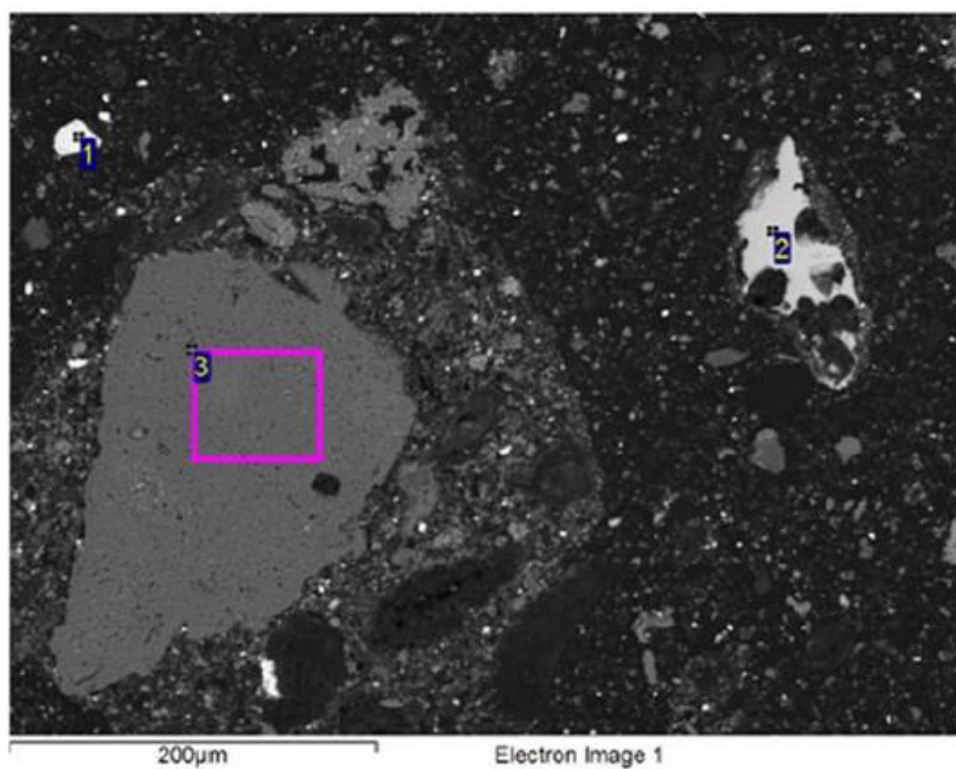
La imagen muestra esfalerita que muestra una alteración incipiente intercalada con los feldespatos Ba-K, los sulfatos de Zn, Fe y Zn.



Spectrum	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Mn	Fe	Zn	Ba	Total	Mineral
1						35.6			2.5	61.9		100	Sphalerite
2						36.3			1.1	62.6		100	Sphalerite
3	47.3	0.7		9.9	23.7		7.5				11.0	100	Ba-feldspar
4	52.8		1.9		3.6	17.5		4.5	2.5	17.3		100	Zn-SO
5	41.4		0.8			7.2		1.4	42.0	7.2		100	Fe-Zn-SO

- **Imagen Nº 10**

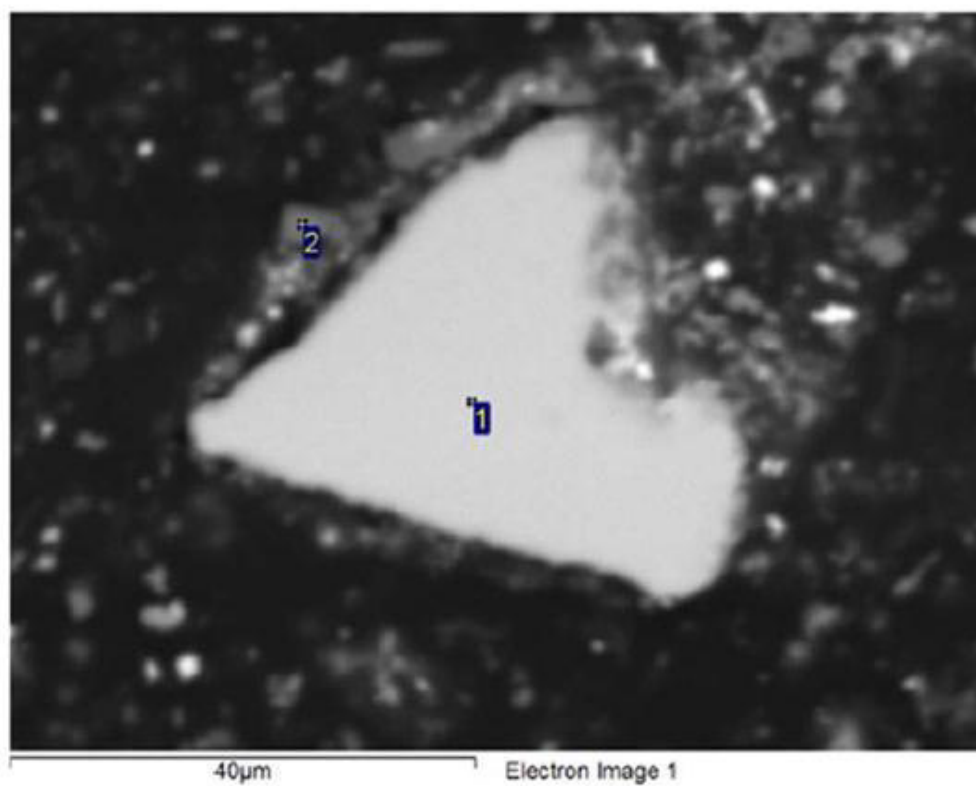
La imagen muestra barita, una esfalerita esquelética y anhidrita.



Spectrum	O	Mg	S	Ca	Fe	Cu	Zn	Ba	Total	Mineral
1	31.7		13.8					54.5	100	Barite
2			36.1		1.7	0.7	61.6		100	Sphalerite
3	51.6	1.6	22.3	24.0			0.6		100	Anhydrite

- **Imagen N° 11**

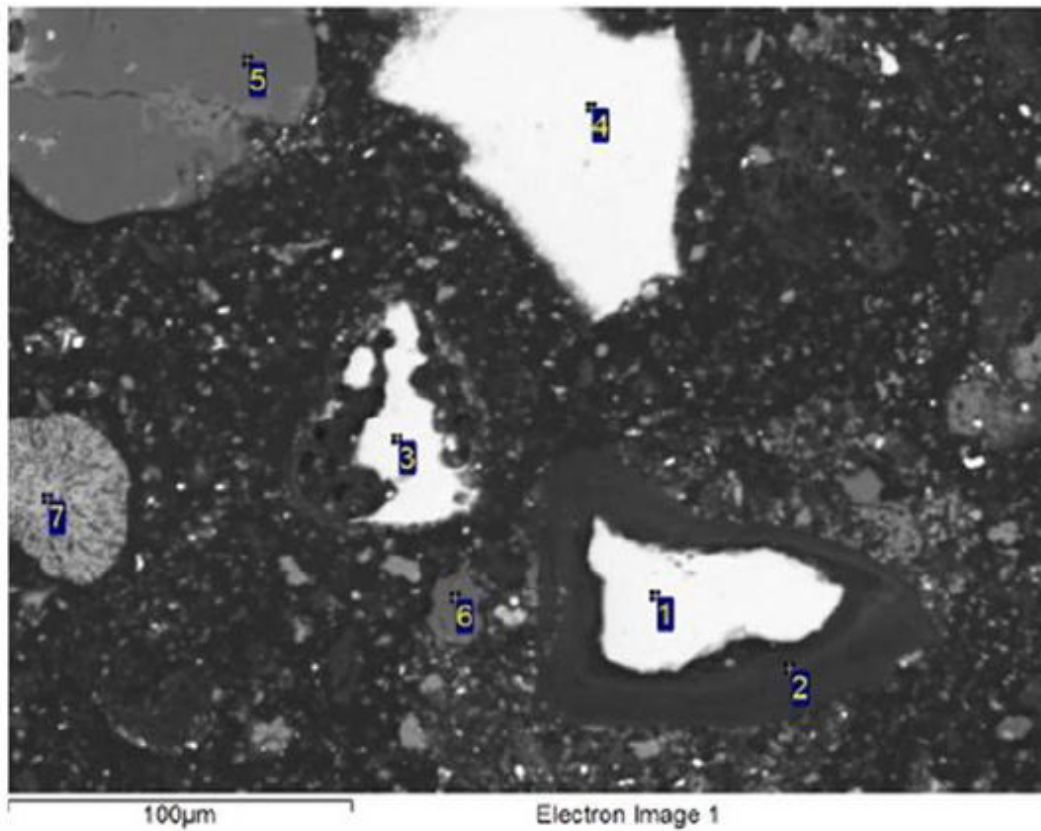
La imagen muestra esfalerita y partículas de anhidrita de grano fino.



Spectrum	O	Si	S	Ca	Mn	Fe	Zn	Total	Mineral
1			36.2		0.4	0.5	62.9	100	Sphalerite
2	54.8	0.8	21.5	22.2			0.8	100	Anhydrite

- **Imagen Nº 12**

La imagen muestra la esfalerita bordeada por una escoria de S-Si, una esfalerita esquelética y libre, escorias de Si y un óxido de Fe u oxihidróxido poroso.



Spectrum	O	Al	Si	S	Fe	Cu	Zn	Total	Mineral
1		0.6		35.8	2.7	0.8	60.1	100	Sphalerite
2	46.0	0.5	34.0	17.6	0.8		1.1	100	S-Si-slag
3		0.7		35.9	1.4		62.0	100	Sphalerite
4		0.6		36.2	3.3		59.9	100	Sphalerite
5	55.5	0.3	42.9			0.8	0.5	100	Si-slag
6	57.1		42.9					100	Si-slag
7	25.7				74.3			100	Fe-Ox

Miembros de Equipo del Proyecto Six Sigma:

Kathya Rivera (Gerente Hidrometalurgia)
Daniel Carbonel (Jefe de Planta - Purificación)
Edgar Carrero (Jefe de Planta - Lixiviación)
Paolo Lermo (Ingeniero Consultor de Hidrometalurgia)
Merly Lopez (Ingeniero de Procesos)
Guilherme Freitas (Ingeniero Sr. SSMA)
Oscar Cardoza (Jefe de Guardia TAC)
Priscilla Salinas (Analista de Logística)

Soporte:

Jose Macassi (Ingeniero Consultor de Procesos)
Hernán Del Águila (Ingeniero Consultor de Procesos)
Renzo Alvarado (Ingeniero de Procesos)
Juliano Alves (Gerente de PCP y Procesos)